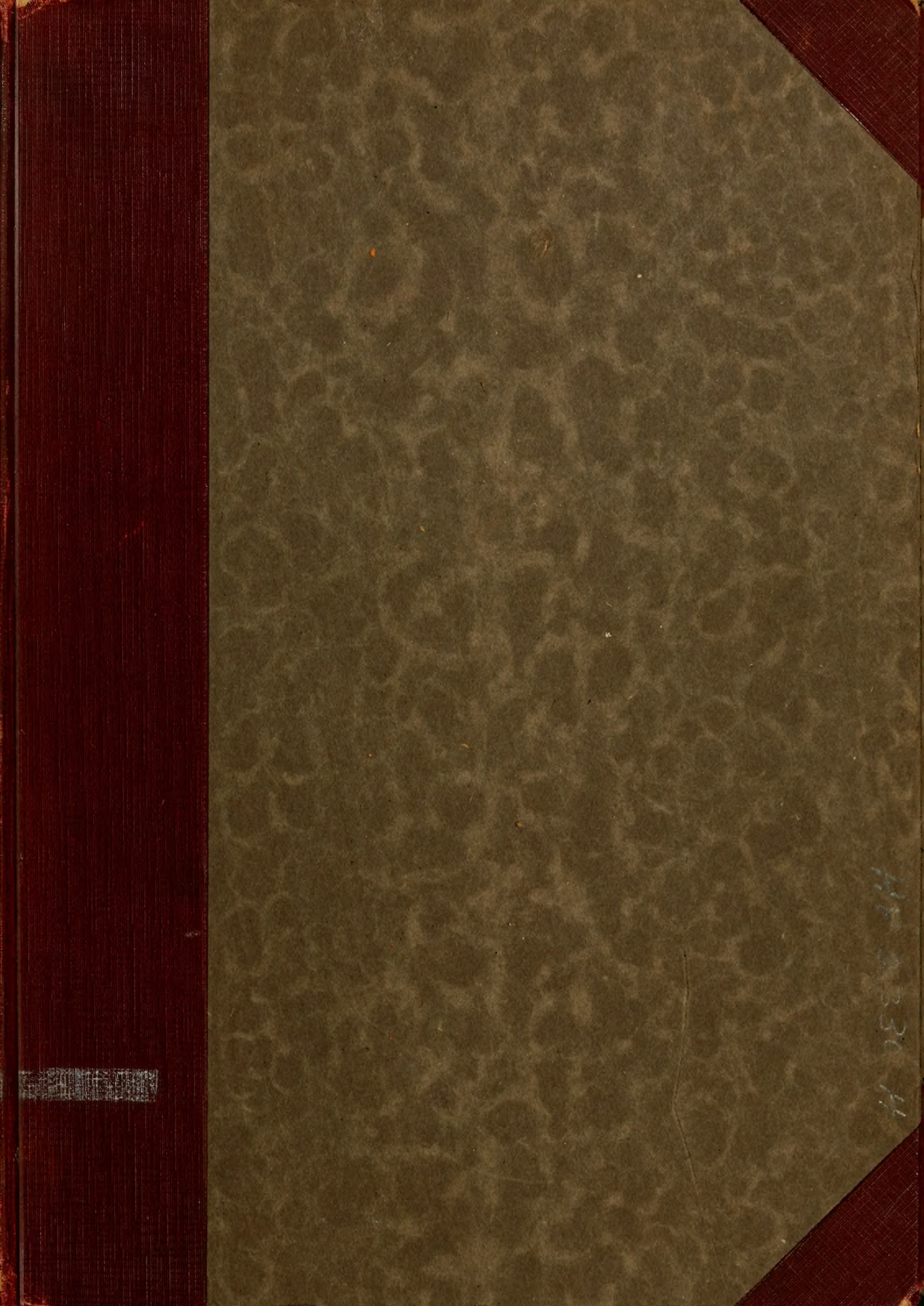
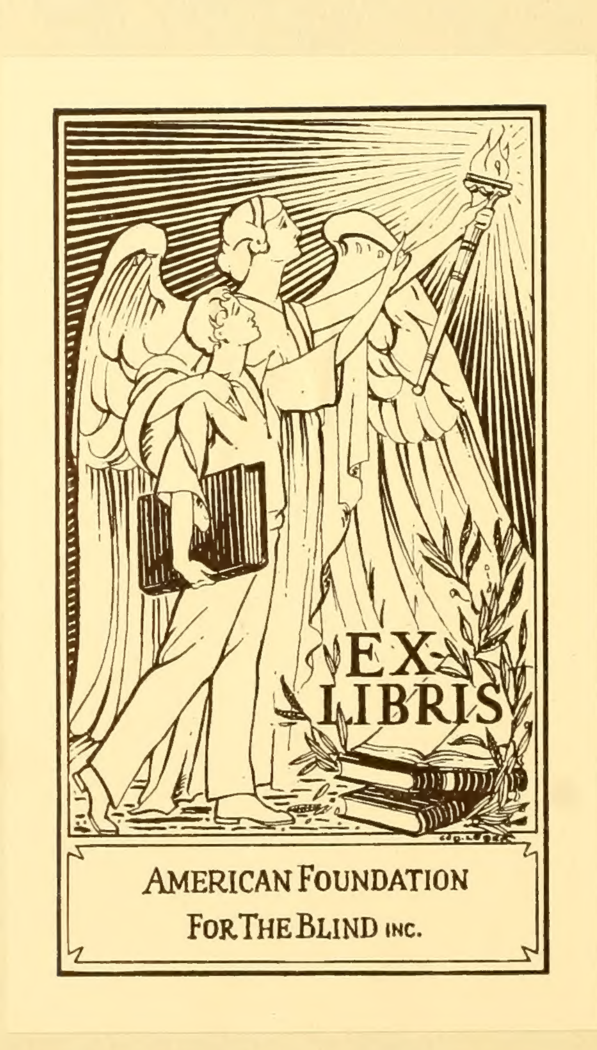
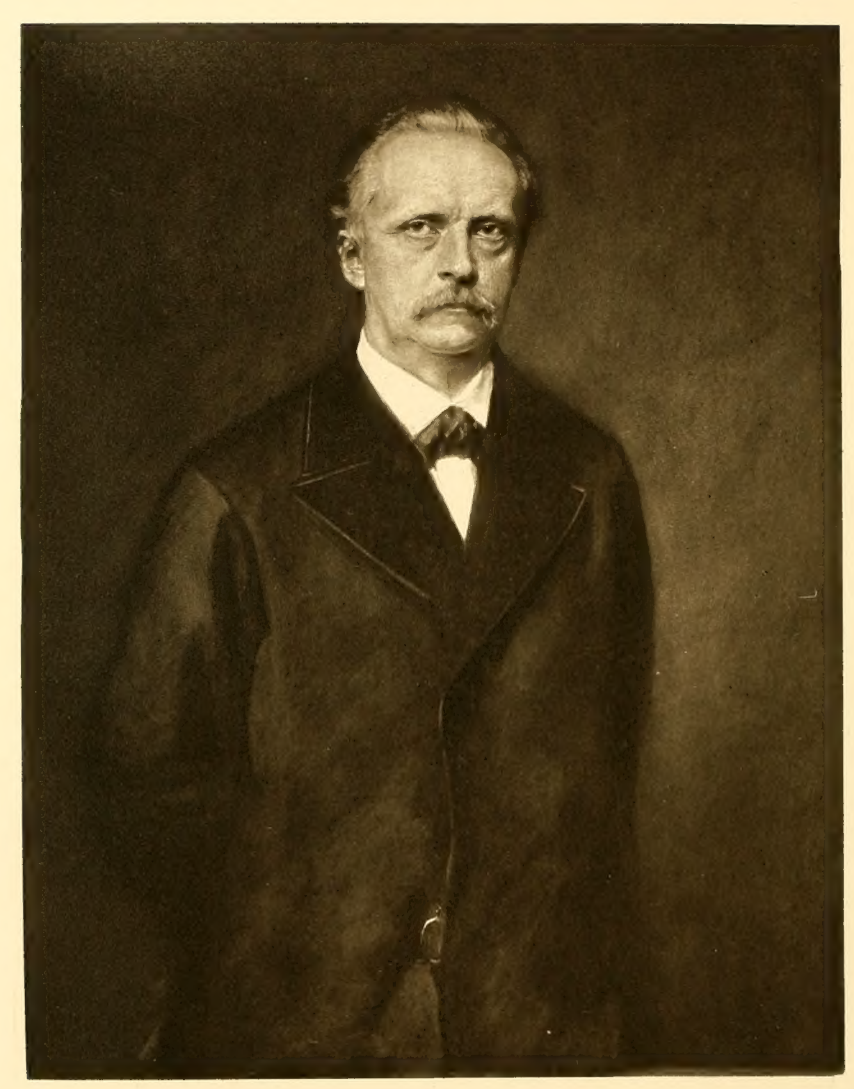



EX
LIBRIS
AMERICAN FOUNDATION
FOR THE BLIND INC.





H. v. Helmholtz

Handbuch

der

Physiologischen Optik

von

H. von Helmholtz.

Dritte Auflage

ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit

Prof. Dr. A. Gullstrand und **Prof. Dr. J. von Kries**

Upsala — Freiburg

von

Professor Dr. W. Nagel

Rostock

Dritter Band

Mit 81 Abbildungen im Text, 6 Tafeln
und einem Porträt von H. von Helmholtz

Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen
herausgegeben von Prof. Dr. **J. von Kries**



Hamburg und Leipzig
Verlag von Leopold Voss
1910.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Wegen Erkrankung des Herrn Herausgebers des zweiten Bandes erscheint der dritte Band vor dem zweiten. Das Register für die drei Bände wird deshalb nicht dem dritten, sondern dem zweiten Band, dessen Erscheinen noch im Laufe des Jahres in Aussicht steht, beigefügt werden.

Hamburg, August 1910

Leopold Voss.



Inhaltsverzeichnis.

Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen.

Zusätze von v. Kries.

Verzeichnis einiger Abkürzungen,

welche in den Zitaten des HELMHOLTZschen Textes gebraucht sind.

Der Band des betreffenden Werkes ist jedesmal mit römischer Ziffer, die Seite mit arabischer bezeichnet, wo eine Zeitschrift mehrere Serien von Bänden umfaßt, ist die arabische Nummer der Serie, eingeklammert (. . . .), der römischen Zahl des Bandes vorausgesetzt worden.

1. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. — Berl. Monatsber.
2. Abhandlungen der mathemathisch-physikalischen Klasse der Königl. Bayr. Akademie der Wissenschaften. — Abh. d. Münch. Ak.
3. Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. — Abh. d. Kön. Ges. zu Göttingen.
4. Göttingische gelehrte Anzeigen unter Aufsicht der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften. — Götting. gel. Anz.

5. Abhandlungen der Leipziger Akademie. — Abh. d. Sächs. Ges. d. Wiss.
6. Berichte der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. — Leipz. Ber.
7. Annalen der Physik und Chemie, herausgegeben von G. Poggendorff. — Pogg. Ann.
8. Journal für reine und angewandte Mathematik, herausgegeben von A. L. Crelle. Crelle's J.
9. Notizen aus dem Gebiete der Natur- und Heilkunde, herausgegeben von Froriep und Schleiden. — Fror. Not.
10. Polytechnisches Journal, herausgegeben von J. G. Dingler und E. M. Dingler. — Dingler's pol. J.
11. *Archives des sciences physiques et naturelles par* de la Rive, Marignac *et* Pictet. — *Arch. d. sc. ph. et nat.* oder *Arch. de* Genève.
12. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. — Phil. Trans.*
13. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. — Edinb. Trans.*
14. *Proceedings of the .... meeting of the British Association. — Rep. of Brit. Assoc.*
15. *The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science, conducted by* Brewster, Taylor, Phillips, Kane. — *Phil. Mag.*
16. *The Edinburgh new philosophical Journal, cond. by* R. Jameson. — *Edinb. J.*
17. *The American Journal of science and arts, cond. by* Silliman, B. Silliman *and* Dana. — *Sillim. J.*
18. *Mémoires présentés à l'Académie Royale de Bruxelles. — Mém. de Brux.*
19. *Bulletin de l'Académie Royale des sciences et belles lettres de Bruxelles. — Bull. de Brux.*
20. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris. — C. R.*
21. *L'Institut, journal universel des sciences et des sociétés savantes en France et à l'étranger. — Inst.*
22. *Mémoires de l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. de Paris.*
23. *Mémoires des savants étrangers, présentes à l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. d. Sar. étr.*
24. *Annales de chimie et de physique par. MM.* Gay-Lussac, Arago, Ghevreul, Dumas, Pelouze, Boussingault *et* Regnault. — *Ann. de ch. et de ph.*
25. *Bullétin de la societé d'encouragement pour l'industrie nationale. — Bull. de la Soc. d'enc.*
26. *Bulletin de la classe physico-mathématique de l'Académie impériale des Sciences de St. Pétersbourg. — Bull. de St. Pét.*
27. *Mémoires préséntes à l'Académie impériale de St. Pétersbourg. — Mém. de Pétersb.*
28. Archiv für Ophthalmologie, herausgegeben von F. Arlt, F. C. Donders und A. v. Graefe. — Arch. f. Ophthalm.
29. Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. — Wien. Ber.
30. *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des Sciences, redigée par* Moigno. Paris. — *Cosmos.*
31. Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, herausgegeben von F. C. Donders und W. Berlin. — Arch. für d. holl. Beitr.
32. Nederlandsch Archief voor Genees- en Natuurkunde, uitgegeven door F. C. Donders en W. Kostfr. — Nederl. Arch.
33. .... Jaarlijksch Verslag betrekkelijk de verpleging en het onderwijs in het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. — Jaarl. Versl. in het Nederl. Gasth.
34. Henle und Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medizin. — Henle u. Pfeuffer Zeitschr. oder Zeitschr. f. rat. Med.
35. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin, herausgegeben früher von J. Müller, jetzt von C. B. Reichert und E. du Bois-Reymond. — J. Müllers Archiv oder Reichert und du Bois Archiv.
36. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. — Jahresber. d. Frankf. Ver.
37. *Athenaeum, journal of litterature, science and the fine arts. — Athen.*

Dritter Abschnitt.

Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen.



§ 26. Von den Wahrnehmungen im allgemeinen.

Wir benutzen die Empfindungen, welche Licht in unserem Sehnervenapparate erregt, um uns aus ihnen Vorstellungen über die Existenz, die Form und die Lage äußerer Objekte zu bilden. Dergleichen Vorstellungen nennen wir Gesichtswahrnehmungen. Wir haben in diesem dritten Abschnitte der physiologischen Optik auseinanderzusetzen, was sich bisher über die Bedingungen, unter denen Gesichtswahrnehmungen zustande kommen, auf naturwissenschaftlichem Wege ermitteln ließ.

Da Wahrnehmungen äußerer Objekte also zu den Vorstellungen gehören, und Vorstellungen immer Akte unserer psychischen Tätigkeit sind, so können auch die Wahrnehmungen immer nur vermöge psychischer Tätigkeit zustande kommen, und es gehört deshalb die Lehre von den Wahrnehmungen schon eigentlich dem Gebiete der Psychologie an, namentlich insofern hierbei die Art der darauf bezüglichen Seelentätigkeiten zu untersuchen ist, und deren Gesetze festzustellen sind. Doch bleibt der physikalisch-physiologischen Untersuchung auch hier ein weites Feld der Arbeit, insofern nämlich festgestellt werden muß, und auf naturwissenschaftlichem Wege auch festgestellt werden kann, welche besonderen Eigentümlichkeiten der physikalischen Erregungsmittel und der physiologischen Erregung Veranlassung geben zur Ausbildung dieser oder jener besonderen Vorstellung über die Art der wahrgenommenen äußeren Objekte. Wir werden also in dem vorliegenden Abschnitte zu untersuchen haben, an welche besonderen Eigentümlichkeiten der Netzhautbilder, der Muskelgefühle usw. sich die Wahrnehmung einer bestimmten Lage des gesehenen Objekts in bezug auf Richtung und Entfernung anknüpft, von welchen Besonderheiten der Bilder die Wahrnehmung einer nach drei Richtungen ausgedehnten körperlichen Form des Objekts abhängt, unter welchen Umständen es mit beiden Augen gesehen einfach oder doppelt erscheint usw. Unser Zweck ist also wesentlich nur das Empfindungsmaterial, welches zur Bildung von Vorstellungen Veranlassung gibt, in denjenigen Beziehungen zu untersuchen, welche für die daraus hergeleiteten Wahrnehmungen wichtig sind. Dieses Geschäft kann ganz nach naturwissenschaftlichen Methoden ausgeführt werden. Wir werden dabei nicht vermeiden können von psychischen Tätigkeiten und den Gesetzen derselben, soweit sie bei der sinnlichen Wahrnehmung in Betracht kommen, zu sprechen, aber wir werden die Ermittelung und Beschreibung dieser psychischen Tätigkeiten nicht als einen wesentlichen Teil unserer vorliegenden Arbeit betrachten, weil wir dabei den Boden sicherer Tatsachen und einer auf allgemein anerkannte und klare Prinzipien gegründeten Methode kaum würden festhalten können. So glaube ich wenigstens vorläufig, das Bereich des psychologischen Teils der Physiologie der Sinne gegen die reine Psychologie abgrenzen zu müssen, deren wesentliche

Aufgabe es ist, die Gesetze und Natur der Seelentätigkeiten, soweit dies möglich ist, festzustellen.

Da indessen nicht ganz vermieden werden kann, von den in den Sinneswahrnehmungen wirksamen Seelentätigkeiten zu reden, wenn man einen übersichtlichen Zusammenhang der Erscheinungen gewinnen, und die Tatsachen nicht unverbunden aneinander reihen will, so will ich, um wenigstens Mißverständnisse meiner Meinung zu verhüten, im Anhang dieses Paragraphen auseinandersetzen, was ich über die besagten Seelentätigkeiten folgern zu dürfen glaube. Da indessen, wie die Erfahrung lehrt, in so abstrakten Folgerungen selten Übereinstimmung zwischen den Menschen zu erzielen ist, und Denker vom größten Scharfsinn, namentlich KANT, schon längst diese Verhältnisse richtig und in strengen Beweisen auseinandergesetzt haben, ohne daß sie eine dauernde und allgemeine Übereinstimmung der Gebildeten darüber zustande bringen konnten, so werde ich versuchen die späteren der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen speziell gewidmeten Paragraphen von allen Ansichten über Seelentätigkeit frei zu erhalten, welche in das Bereich der zwischen den verschiedenen philosophischen Schulen bisher und vielleicht für immer streitigen Punkte fallen, um nicht die für die Tatsachen zu gewinnende mögliche Übereinstimmung durch Streitigkeiten über abstrakte Sätze zu stören, welche in das uns vorliegende Geschäft nicht notwendig hineingezogen zu werden brauchen.

Ich will hier nur zunächst den Leser vorbereiten auf gewisse allgemeine Eigentümlichkeiten der in den Sinneswahrnehmungen wirksamen Seelentätigkeiten, welche uns bei der Behandlung der verschiedenen Gegenstände immer wieder begegnen werden, und in dem einzelnen Falle oft paradox und unglaublich erscheinen, wenn man sich nicht ihre allgemeine Bedeutung und ihre ausgedehnte Wirksamkeit klar gemacht hat.

Die allgemeine Regel, durch welche sich die Gesichtsvorstellungen bestimmen, die wir bilden, wenn unter irgendwelchen Bedingungen oder mit Hilfe von optischen Instrumenten ein Eindruck auf das Auge gemacht worden ist, ist die, daß w i r s t e t s s o l c h e O b j e k t e a l s i m G e s i c h t s f e l d e v o r h a n d e n u n s v o r s t e l l e n, w i e s i e v o r h a n d e n s e i n m ü ß t e n, u m u n t e r d e n g e w ö h n l i c h e n n o r m a l e n B e d i n g u n g e n d e s G e b r a u c h s u n s e r e r A u g e n d e n s e l b e n E i n d r u c k a u f d e n N e r v e n a p p a r a t h e r v o r z u b r i n g e n. Um ein Beispiel zu benutzen, von dem wir schon gesprochen haben, nehmen wir an, es sei der Augapfel am äußeren Augenwinkel mechanisch gereizt worden. Wir glauben dann eine Lichterscheinung in der Richtung des Nasenrückens im Gesichtsfelde vor uns zu sehen. Wenn bei dem gewöhnlichen Gebrauche unserer Augen, wo sie durch von außen kommendes Licht erregt werden, eine Erregung der Netzhaut in der Gegend des äußeren Augenwinkels zustande kommen soll, muß in der Tat das äußere Licht von der Gegend des Nasenrückens her in das Auge fallen. Es ist also der eben aufgestellten Regel gemäß, daß wir in solchem Falle ein lichtes Objekt in die genannte Stelle des Gesichtsfeldes hinein versetzen, trotzdem der mechanische Reiz hierbei weder von vorn vom Gesichtsfelde her, noch von der Nasenseite des Auges, sondern im Gegenteil von der äußeren Fläche des Augapfels und mehr von hinten her einwirkt. Wir werden im folgenden die allgemeine Gültigkeit der gegebenen Regel in einer großen Zahl von Fällen noch kennen lernen.

Daß in der Formulierung jener Regel der gewöhnliche Gebrauch des Auges, wo der Sehnervenapparat von äußerem Lichte erregt wird, und dieses äußere

Licht von den undurchsichtigen Körpern, die es zuletzt auf seinem Wege getroffen hat, auf geradem Wege durch eine ununterbrochene Luftschicht in das Auge gelangt ist, als der normale Gebrauch des Organs bezeichnet ist, ist wohl dadurch gerechtfertigt, daß diese Art der Erregung in einer so ungeheuer überwiegenden Zahl von Fällen stattfindet, daß alle anderen Fälle der Erregung, wo brechende oder spiegelnde Flächen den Gang der Lichtstrahlen abändern, oder die Erregungen nicht durch äußeres Licht zustande kommen, als seltene Ausnahmen betrachtet werden können. Es ist dies eben dadurch bedingt, daß die Netzhaut im Hintergrund des festen Augapfels vor allen anderen reizenden Einwirkungen ziemlich vollständig geschützt und nur dem äußeren Lichte leicht zugänglich ist. Wenn übrigens die Anwendung eines optischen Instruments, z. B. einer Brille, durch fortdauernden Gebrauch zur Norm gemacht wird, so akkommodiert sich auch die Deutung der Gesichtsbilder bis zu einem gewissen Grade diesen veränderten Umständen.

Die aufgestellte Regel entspricht übrigens einer allgemeinen Eigentümlichkeit aller Sinneswahrnehmungen, nicht bloß des Gesichts allein. Die Erregung der Tastnerven z. B. geschieht in der ungeheuer überwiegenden Mehrzahl der Fälle durch Einwirkungen, welche die in der Hautfläche gelegenen Endausbreitungen dieser Nerven treffen; nur ausnahmsweise werden die Stämme durch stärkere Einwirkungen erregt werden können. Unserer oben gegebenen Regel entprechend, werden deshalb alle Erregungen von Hautnerven, auch wenn sie deren Stamm, oder selbst das zentrale Ende treffen, in der Wahrnehmung an die entsprechende peripherische Hautfläche verlegt. Die auffallendsten und überraschendsten Fälle solcher Täuschung sind diejenigen, wo die entsprechende peripherische Hautfläche gar nicht mehr existiert, z. B. bei Leuten, denen ein Bein amputiert ist. Solche glauben oft noch lange Zeit nach der Operation sehr lebhafte Empfindungen in dem abgeschnittenen Fuße zu haben. Sie fühlen genau, welche Stellen dieses oder jenes Zehen schmerzen. Die Erregung kann hier natürlich nur den noch bestehenden Stumpf des Nervenstammes treffen, dessen Fäden ehemals nach den abgeschnittenen Zehen hinliefen, und meistens ist es wohl das Ende des Nerven in der Narbe, welches durch äußeren Druck oder die Kontraktion des Narbengewebes gereizt wird. Zuweilen werden des Nachts die Empfindungen in der fehlenden Extremität so lebhaft, daß die Leute hinfühlen müssen, um sich zu überzeugen, daß ihre Extremität ihnen wirklich fehlt.

In solchen Fällen ungewöhnlicher Erregungsweise der Sinnesorgane werden also unrichtige Vorstellungen von den Objekten gebildet, und man hat solche Fälle deshalb früher mit dem Namen der Sinnestäuschungen belegt. Es ist klar, daß es in solchen Fällen nicht eine unrichtige Tätigkeit des Sinnesorgans und des dazu gehörigen Nervenapparats ist, welche die Täuschung hervorbringt. Beide können nicht anders als nach den Gesetzen wirken, welche ein für allemal ihre Tätigkeit beherrschen. Es ist vielmehr nur eine Täuschung in der Beurteilung des dargebotenen Materials von Sinnesempfindungen, wodurch eine falsche Vorstellung entsteht.

Die psychischen Tätigkeiten, durch welche wir zu dem Urteile kommen, daß ein bestimmtes Objekt von bestimmter Beschaffenheit an einem bestimmten Orte außer uns vorhanden sei, sind im allgemeinen nicht bewußte Tätigkeiten, sondern unbewußte. Sie sind in ihrem Resultate einem Schlusse gleich, insofern wir aus der beobachteten Wirkung auf unsere Sinne die Vorstellung

von einer Ursache dieser Wirkung gewinnen, während wir in der Tat direkt doch immer nur die Nervenerregungen, also die Wirkungen wahrnehmen können, niemals die äußeren Objekte. Sie erscheinen aber von einem Schlusse — dieses Wort in seinem gewöhnlichen Sinne genommen — dadurch unterschieden, daß ein solcher ein Akt des bewußten Denkens ist. Dergleichen wirkliche bewußte Schlüsse sind es zum Beispiel, wenn ein Astronom aus den perspektivischen Bildern, welche ihm die Gestirne in verschiedenen Zeiten und von verschiedenen Punkten der Erdbahn aus dargeboten haben, die Lage derselben im Weltraum, ihre Entfernung von der Erde usw. berechnet. Der Astronom stützt seine Schlüsse auf eine bewußte Kenntnis der Sätze der Optik. Eine solche Kenntnis der Optik fehlt bei den gewöhnlichen Akten des Sehens. Indessen mag es erlaubt sein, die psychischen Akte der gewöhnlichen Wahrnehmung als unbewußte Schlüsse zu bezeichnen, da dieser Name sie hinreichend von den gewöhnlich so genannten bewußten Schlüssen unterscheidet, und wenn auch die Ähnlichkeit der psychischen Tätigkeit in beiden bezweifelt worden ist, und vielleicht auch bezweifelt werden wird, doch die Ähnlichkeit der Resultate solcher unbewußten und der bewußten Schlüsse keinem Zweifel unterliegt.

Die bezeichneten unbewußten Schlüsse von der Sinnesempfindung auf deren Ursache sind nun in ihren Resultaten den sogenannten Analogieschlüssen kongruent. Weil in einer millionenfachen Überzahl von Fällen die Erregung der Netzhautstellen am äußeren Augenwinkel von äußerem Lichte herrührte, welches von der Gegend des Nasenrückens her in das Auge fiel, urteilen wir, daß es auch in jedem neu eintretenden Falle so sei, wo die genannte Netzhautstelle erregt wird, ebenso, wie wir behaupten, daß jeder einzelne jetzt lebende Mensch sterben werde, weil bisher die Erfahrung ergeben hat, daß alle früher lebenden Menschen gestorben sind.

Jene unbewußten Analogieschlüsse treten aber ferner, eben weil sie nicht Akte des freien bewußten Denkens sind, mit zwingender Notwendigkeit auf, und ihre Wirkung kann nicht durch bessere Einsicht in den Zusammenhang der Sache aufgehoben werden. Wir mögen noch so gut einsehen, auf welche Weise die Vorstellung von einer Lichterscheinung im Gesichtsfelde zustande kommt, wenn das Auge gedrückt wird, doch werden wir dadurch die Überzeugung, daß diese Lichterscheinung in der bestimmten Stelle des Gesichtsfeldes vorhanden sei, nicht fortschaffen, und nicht die Anschauung von einer Lichterscheinung am Orte der gereizten Netzhautstelle zustande bringen können. Dasselbe ist der Fall bei allen Bildern, welche uns optische Instrumente zeigen.

Obgleich nun andererseits vielfältige Beispiele dafür vorliegen, wie fest und unausweichlich Vorstellungsverbindungen durch häufige Wiederholung werden, selbst wenn sie nicht auf natürlicher Verbindung beruhen, sondern nur auf verabredetem Übereinkommen z. B. zwischen den geschriebenen Buchstaben eines Wortes, dem Klange und der Bedeutung desselben, so pflegt doch die Verbindung der Sinnesempfindung mit der Vorstellung vom Objekte derselben vielen Physiologen und Psychologen so fest und zwingend zu erscheinen, daß sie wenig geneigt sind, anzuerkennen, daß diese Verbindung, wenigstens großenteils, auf erworbener Erfahrung, also auf psychischer Tätigkeit beruhe, daß sie im Gegenteil nach einer mechanischen Entstehungsweise derselben durch vorgebildete organische Strukturen suchten. In dieser Beziehung sind nun alle diejenigen Erfahrungen von großer Bedeutung, welche nachweisen, wie durch Erfahrung und Einübung, die unter veränderten Umständen angestellt sind, die Beurtei-

lung der Sinnesempfindungen verändert und den neuen Bedingungen angepaßt werden kann, so daß man teils lernt, Einzelheiten der Empfindung, die sonst nicht beachtet werden, und keine Anschauung vom Objekt erzeugen, für eine solche nutzbar zu machen, andererseits auch die neu eintretende Gewöhnung so weit gehen kann, daß das betreffende Individuum in die alten ursprünglich normalen Zustände zurückversetzt nun Sinnestäuschungen anheim fällt.

Dergleichen Tatsachen lassen den ausgedehnten Einfluß erkennen, welchen Erfahrung, Einübung und Gewöhnung auf unsere Wahrnehmungen haben. Wie weit ihr Einfluß aber wirklich geht, dies vollständig und genügend abzugrenzen möchte vor der Hand unmöglich sein; an neugeborenen Kindern und Tieren läßt sich wenig genug ermitteln, und die Deutung der an ihnen gemachten Beobachtungen ist äußerst zweifelhafter Art; außerdem kann man den Neugeborenen nicht einmal Erfahrung und Übung in Tastempfindungen und Körperbewegungen ganz absprechen. Ich habe deshalb der oben hingestellten Regel eine Form gegeben, welche der Entscheidung dieser Frage nicht vorgreift, und sich nur über das Resultat ausspricht, so daß sie auch von solchen Lesern angenommen werden kann, welche sich ganz andere Ideen über das Zustandekommen der Vorstellungen von Objekten der Außenwelt machen.

Eine zweite allgemeine Eigentümlichkeit unserer Sinneswahrnehmungen ist die, daß wir auf unsere Sinnesempfindungen nur so weit leicht und genau aufmerksam werden, als wir sie für die Erkenntnis äußerer Objekte verwerten können, daß wir dagegen von allen denjenigen Teilen der Sinnesempfindungen zu abstrahieren gewöhnt sind, welche keine Bedeutung für die äußeren Objekte haben, so daß meistenteils eine besondere Unterstützung und Einübung für die Beobachtung dieser letzteren, subjektiven Empfindungen notwendig ist. Während nichts leichter erscheint, als sich seiner eigenen Sinnesempfindungen bewußt zu werden, lehrt die Erfahrung, daß zur Entdeckung der subjektiven Empfindungen oft genug entweder besonderes Talent nötig ist, wie es PURKINJE im höchsten Grade bewährt hat, oder Zufall, oder theoretische Spekulation. So sind zum Beispiel die Erscheinungen des blinden Flecks von MARIOTTE auf theoretischem Wege gefunden, ebenso von mir im Gebiete des Gehörs die Existenz derjenigen Kombinationstöne, welche ich Summationstöne genannt habe. In der überwiegenden Zahl der Fälle ist es wohl der Zufall gewesen, welcher Beobachtern, deren Aufmerksamkeit auf subjektive Erscheinungen besonders gerichtet war, bald diese bald jene zugeführt hat; nur da wo die subjektiven Erscheinungen so intensiv werden, daß sie die Wahrnehmung der Objekte stören, fallen sie allen Menschen auf. Sind die Erscheinungen erst einmal gefunden, so ist es meist leichter auch für andere Beobachter, die sich in die richtigen Bedingungen der Beobachtung setzen, und ihre Aufmerksamkeit darauf richten, sie wahrzunehmen. Aber in vielen Fällen, z. B. bei den Erscheinungen des blinden Flecks, bei der Scheidung der Obertöne und Kombinationstöne von den Grundtönen musikalischer Klänge usw. wird eine so angestrengte Anspannung der Aufmerksamkeit verlangt, selbst bei zweckmäßig angewendeten äußeren Hilfsmitteln, daß die Versuche vielen Personen nicht gelingen wollen. Selbst die Nachbilder heller Objekte werden von den meisten Personen anfangs nur bei besonders günstigen äußeren Umständen wahrgenommen, erst nach öfterer Übung lernt man auch die schwächeren Bilder dieser Art sehen. Eine gewöhnlich vorkommende hierher gehörige Erfahrung ist die, daß Leute, welche an

irgendwelcher Augenkrankheit leiden, die ihnen das Sehen erschwert, plötzlich die fliegenden Mücken bemerken, welche sie schon während ihres ganzen Lebens im Glaskörper gehabt haben, und sich nun fest einbilden, diese Körperchen seien erst seit der Erkrankung ihres Auges aufgetreten, während in der Tat der Patient durch die Erkrankung auf seine Gesichtserscheinungen nur aufmerksamer geworden ist. Auch kommen wohl Fälle vor von allmählicher Erblindung eines Auges, womit die Patienten eine unbestimmte Zeit herumgegangen sind, ohne es zu bemerken, bis sie zufällig einmal das gesunde Auge allein schließen, und die Blindheit des anderen bemerken.

Sehr gewöhnlich wundern sich die Leute, welche man zuerst auf die binokularen Doppelbilder aufmerksam macht, ungemein darüber, daß sie sie sonst nicht bemerkt haben, trotzdem sie in jedem Augenblicke ihres Lebens fortdauernd nur eine kleine Zahl von Gegenständen, die ungefähr in gleicher Entfernung vom Auge wie der jedesmalige Fixationspunkt liegen, einfach gesehen haben, die größere Mehrzahl aber, nämlich sämtliche ferneren und näheren Gegenstände doppelt.

Wir müssen also erst lernen, unseren einzelnen Empfindungen die Aufmerksamkeit zuzuwenden, und wir lernen dies für gewöhnlich nur für die Empfindungen, die uns als Mittel zur Erkenntnis der Außenwelt dienen. Nur zu diesem Zwecke haben die Sinnesempfindungen eine Wichtigkeit für uns im gewöhnlichen Leben, die subjektiven Empfindungen sind meist nur für die wissenschaftlichen Untersuchungen interessant; wenn sie beim gewöhnlichen Gebrauche der Sinne bemerkt werden, können sie nur störend eingreifen. Während wir deshalb in der objektiven Beobachtung einen außerordentlichen Grad von Feinheit und Sicherheit erreichen, erlangen wir diesen für die subjektiven Beobachtungen nicht nur nicht, sondern wir erlangen sogar in einem hohen Grade die Fähigkeit diese zu übersehen, und uns in der Beurteilung der Objekte von ihnen unabhängig zu erhalten, selbst wo sie sich durch ihre Stärke leicht genug bemerklich machen könnten.

Das allgemeinste Kennzeichen der subjektiven Gesichtserscheinungen scheint namentlich in ihrer Bewegung mit dem Auge zugleich über das Gesichtsfeld hin zu liegen. So bewegen sich die Nachbilder, die fliegenden Mücken, der blinde Fleck, der Lichtstaub des dunklen Feldes mit dem Auge fort, und decken sich nacheinander mit den verschiedensten ruhenden Objekten des Gesichtsfeldes. Wenn dagegen dieselben Erscheinungen immer wieder an denselben Stellen des Gesichtsfeldes auftreten, werden sie für objektiv und den Gegenständen anhaftend gehalten, wie das der Fall ist bei den Kontrasterscheinungen, welche durch Nachbilder entstehen.

Dieselbe Schwierigkeit, welche wir finden, Empfindungen subjektiver Art zu beobachten, d. h. solche, welche durch innere Ursachen hervorgerufen sind, dieselbe tritt auch ein, wenn zusammengesetzte Empfindungen, welche stets in derselben Verbindung durch irgend ein einfaches Objekt erregt werden, in ihre einzelnen Bestandteile aufgelöst werden sollen. In solchen Fällen lehrt uns die Erfahrung ein zusammengesetztes Aggregat von Empfindungen als das Zeichen für ein' einfaches Objekt kennen, und gewöhnt den Empfindungskomplex als ein zusammengehöriges Ganze zu betrachten, vermögen wir in der Regel nicht ohne äußere Hilfe und Unterstützung uns der einfachen Bestandteile eines solchen bewußt zu werden. Beispiele dieser Art werden wir im folgenden viele kennen lernen. Die Wahrnehmung der Richtung zum Beispiel,

in welcher sich ein Objekt vom Auge befindet, beruht auf der Kombination derjenigen Empfindungen, nach denen wir die Stellung des Auges beurteilen, und der Unterscheidung derjenigen Netzhautteile, welche vom Lichte getroffen sind, von den nicht getroffenen. Die Wahrnehmung der körperlichen Form eines nach drei Dimensionen ausgedehnten Objekts beruht auf der Kombination zweier verschiedener perspektivischer Ansichten von beiden Augen. Die scheinbar einfache Qualität des Glanzes einer Fläche beruht auf verschiedener Färbung oder Helligkeit ihres Bildes in beiden Augen. Es sind diese Sätze theoretisch gefunden, und können durch passende Versuche erwiesen werden, aber es ist meist sehr schwer, oft unmöglich, durch direkte Beobachtung und Analyse der Empfindungen allein dies zu finden. Selbst bei viel zusammengesetzteren Empfindungen, die nur häufig wiederkehrenden zusammengesetzten Objekten entsprechen, wird die Analyse der Empfindung durch bloße Beobachtung desto schwerer, je häufiger dieselbe Zusammensetzung wiedergekehrt ist, und je mehr wir uns gewöhnt haben, sie als das normale Zeichen der wirklichen Beschaffenheit des Objekts zu betrachten. Als Beispiel dazu möge die bekannte Erfahrung dienen, daß die Farben einer Landschaft viel glänzender und bestimmter heraustreten, wenn man sie bei schiefer oder umgekehrter Lage des Kopfes betrachtet, als bei der gewöhnlichen aufrechten Haltung. Bei der gewöhnlichen Art der Beobachtung suchen wir nur die Objekte als solche richtig zu beurteilen. Wir wissen, daß grüne Flächen von einer gewissen Entfernung in etwas verändertem Farbenton erscheinen; wir gewöhnen uns von dieser Veränderung abzusehen, und lernen das veränderte Grün ferner Wiesen und Bäume doch mit der entsprechenden Farbe naher Objekte zu identifizieren. Bei sehr fernen Objekten, fernen Bergreihen bleibt von der Körperfarbe wenig zu erkennen, sie wird meist durch die Farbe der erleuchteten Luft überdeckt. Diese unbestimmt blaugraue Farbe, an welche nach oben das helle blaue Feld des Himmels oder das rotgelbe der Abendbeleuchtung, nach unten das lebhafte Grün der Wiesen und Wälder grenzt, ist Veränderungen durch den Kontrast sehr ausgesetzt. Es ist für uns die unbestimmte und wechselnde Farbe der Ferne, deren Unterschied zu verschiedenen Zeiten und bei verschiedenen Beleuchtungen wir wohl genauer beachten, während wir ihre wahre Beschaffenheit nicht bestimmen, da wir sie auf kein bestimmtes Objekt zu übertragen haben, und wir eben ihre wechselnde Beschaffenheit kennen. So wie wir uns aber in ungewöhnliche Umstände versetzen, z. B. unter dem Arme oder zwischen den Beinen durchsehen, so erscheint uns die Landschaft als ein plattes Bild, teils wegen der ungewöhnlichen Lage ihres Bildes im Auge, teils weil die binokulare Beurteilung der Entfernung, wie wir unten sehen werden, ungenauer wird. Ja es kommt wohl vor, daß bei umgekehrtem Kopfe die Wolken richtige Perspektive bekommen, während die Objekte der Erde als ein Gemälde auf senkrechter Fläche erscheinen, wie sonst die Wolken am Himmel. Damit verlieren auch die Farben ihre Beziehung zu nahen oder fernen Objekten, und treten uns nun rein in ihren eigentümlichen Unterschieden entgegen[1]. Da erkennen wir denn ohne Mühe, daß das unbestimmte Blaugrau der weiten Ferne oft ziemlich gesättigtes Violett ist, daß das Grün der Vegetation stufenweise durch Blaugrün und Blau in jenes Violett übergeht usw. Dieser ganze Unterschied scheint mir nur darauf zu beruhen, daß wir die Farben nicht mehr als

[1] Dieselbe Erklärung bei O. N. Rood, in Silliman *Journal* (2) XXXII. p. 184—185. 1861.

Zeichen für die Beschaffenheit von Objekten betrachten, sondern nur noch als verschiedene Empfindungen, und wir deshalb ihre eigentümlichen Unterschiede, unbeirrt durch andere Rücksichten genauer auffassen.

Wie sehr wir durch die Beziehung der Empfindungen auf äußere Objekte an der Perzeption der einfachsten Verhältnisse der Empfindungen selbst gestört werden, wird sich namentlich auch in der Schwierigkeit zeigen, mit der wir die binokularen Doppelbilder wahrnehmen, wenn dieselben als Bilder ein und desselben äußeren Objekts aufgefaßt werden können.

Die gleichen Erfahrungen können wir im Gebiete anderer Sinnesempfindungen in gleicher Weise machen. Die Empfindungen der Klangfarbe eines Schalls ist, wie ich anderwärts[1] gezeigt habe, zusammengesetzt aus einer Reihe von Empfindungen seiner einzelnen Partialtöne (Grundton und harmonische Obertöne), aber es ist außerordentlich schwer, die zusammengesetzte Empfindung des Klanges in diese ihre Bestandteile aufzulösen. Die Tastempfindung des Nassen ist zusammengesetzt aus der der Kälte und des leichten Gleitens über die Oberfläche. Wenn wir deshalb unvermutet ein kaltes glattes Metallstück berühren, glauben wir oft etwas Nasses berührt zu haben. Beispiele dieser Art würden sich noch viele häufen lassen. Sie alle zeigen, daß wir außerordentlich gut eingeübt sind, aus unseren Sinnesempfindungen die objektiven Beschaffenheiten der Objekte der Außenwelt zu ermitteln, in der Beobachtung unserer Empfindungen an sich aber vollständig ungeübt, und daß uns die eingeübte Beziehung auf die Außenwelt sogar hindert, die reinen Empfindungen uns deutlich zum Bewußtsein zu bringen.

Auch ist dies nicht bloß für die qualitativen Unterschiede der Empfindung geltend, es gilt ebenso für die Wahrnehmung räumlicher Verhältnisse. Die Bewegung eines gehenden Menschen z. B. ist uns ein vertrauter und gewohnter Anblick. Wir betrachten sie als zusammenhängendes Ganze, und werden uns höchstens ihrer auffallendsten Einzelheiten bewußt. Es gehört große Aufmerksamkeit dazu, und eine besondere Wahl des Gesichtspunkts, um die senkrechten und seitlichen Schwankungen des Körpers eines Gehenden zu erkennen. Wir müssen passend gelegene Punkte oder Linien des Hintergrunds wählen, mit dem wir die Lage seines Kopfes vergleichen. Man betrachte aber einmal ferne gehende Menschen durch ein astronomisches Fernrohr, welches umgekehrte Bilder zeigt, welch ein seltsames Hüpfen und Wiegen des Körpers die Gehenden hervorbringen. Dabei hat man gar keine Schwierigkeiten mehr, die einzelnen Schwankungen des Körpers und manche andere Einzelheiten des Ganges, namentlich auch die individuellen Verschiedenheiten und deren Grund zu erkennen, nur weil dieser Anblick nicht mehr der alltäglich gewohnte ist. Dagegen tritt im umgekehrten Bilde der Charakter des Ganges, ob er leicht oder schwerfällig, würdevoll oder anmutig ist, nicht mehr so gut hervor, wie im aufrechten.

Es kann unter diesen Umständen oft recht schwer werden, zu beurteilen, was in unseren durch den Gesichtssinn gewonnenen Anschauungen unmittelbar durch die Empfindung, und was im Gegenteil durch Erfahrung und Einübung bedingt ist. An diese Schwierigkeit knüpft sich auch der hauptsächlichste prinzipielle Gegensatz, welcher zwischen verschiedenen Forschern in diesem Gebiete besteht. Die einen sind geneigt, dem Einfluß der Erfahrung einen

[1] Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig 1862.

möglichst breiten Spielraum einzuräumen, namentlich alle Raumanschauung daraus herzuleiten; wir können diese Ansicht als die empiristische Theorie bezeichnen. Die andern müssen allerdings den Einfluß der Erfahrung für eine gewisse Reihe von Wahrnehmungen zugeben, glauben aber für gewisse bei allen Beobachtern gleichförmig eintretende elementare Anschauungen ein System von angeborenen und nicht auf Erfahrung begründeten Anschauungen, namentlich der Raumverhältnisse, voraussetzen zu müssen. Wir dürfen diese letztere Ansicht im Gegensatz zur ersteren wohl als die nativistische Theorie der Sinneswahrnehmungen bezeichnen.

In diesem Streite sind, wie ich glaube, folgende Grundsätze festzuhalten.

Wenn wir den Namen der Vorstellung beschränken auf das Erinnerungsbild von Gesichtsobjekten, welches von keinen gegenwärtigen sinnlichen Empfindungen begleitet ist, den der Anschauung auf die von den bezüglichen sinnlichen Empfindungen begleitete Wahrnehmung, den der Perzeption auf eine solche Anschauung, in der nichts enthalten ist, was nicht aus den unmittelbar gegenwärtigen sinnlichen Empfindungen hervorgeht, also eine Anschauung, wie sie auch ohne alle Erinnerung an früher Erfahrenes sich bilden könnte, so ist zunächst klar, daß ein und dieselbe Anschauung in sehr verschiedenem Maße von den entsprechenden sinnlichen Empfindungen begleitet sein kann, daß also Vorstellung und Perzeption in den verschiedensten Verhältnissen sich zur Anschauung verbinden können.

Wenn ich mich in einem bekannten Zimmer befinde bei hellem Sonnenschein, so habe ich eine von sehr energischen Empfindungen reichlich begleitete Anschauung. In demselben Raum werde ich abends in der Dämmerung nur die helleren Objekte erkennen können, namentlich die Fenster, aber was ich wirklich noch erkenne, schmilzt mit meinen Gedächtnisbildern, die das Zimmer betreffen, so zusammen, daß ich immer noch imstande sein werde, mich in demselben sicher umher zu bewegen und Gegenstände, die ich suche, zu finden, selbst wenn ich von ihnen nur ein schattenhaftes Bild erhaschen kann, was ohne meine vorgängige Kenntnis durchaus ungenügend wäre, sie zu erkennen. Endlich kann ich mich in demselben Raume in absolutem Dunkel befinden, und mich doch, vermöge der Erinnerung an die früher von ihm erhaltenen Gesichtsbilder in ihm zurecht finden, so daß das Anschauungsbild durch immer weitere Beschränkung des sinnlichen Materials endlich auf das reine Vorstellungsbild zurückgeführt werden und in dieses allmählich übergehen kann. Meine Bewegungen werden allerdings um so unsicherer, meine Anschauung um so ungenauer werden, je mehr das sinnliche Material entzogen wird, indessen wird kein eigentlicher Sprung stattfinden, sondern Empfindung und Erinnerung werden sich fortdauernd ergänzen, nur in verschiedenem Maße.

Aber selbst, wenn wir ein solches Zimmer bei vollem Sonnenschein beschauen, so zeigt eine leichte Überlegung, daß auch dann ein großer Teil unseres Anschauungsbildes auf Momenten der Erinnerung und Erfahrung beruhen mag. Unsere Gewöhnung an die perspektivischen Verziehungen der Bilder parallelopipedischer Körper und an die Form der Schlagschatten ist bei der Beurteilung seiner Form und Größe von beträchtlichem Einflusse, wie wir später sehen werden. Schließen wir, während wir das Zimmer betrachten, ein Auge, so glauben wir es nicht weniger deutlich und bestimmt vor uns zu sehen, als mit zwei Augen, und doch würde uns nun genau dasselbe Gesichtsbild gegeben werden, wenn alle Punkte des Zimmers so verschoben würden, daß sie ihre

Entfernung vom Auge beliebig änderten, aber auf denselben Visierlinien blieben.

Während wir also in Wahrheit in einem solchen Falle eine äußerst vieldeutige sinnliche Erscheinung vor uns haben, geben wir ihr doch eine ganz bestimmte Auslegung, und es ist gar nicht leicht, sich dessen bewußt zu werden, daß das einäugige Bild eines solchen wohlbekannten Gegenstandes eine viel mangelhaftere Wahrnehmung bedingt, als das der beiden Augen. So ist es auch, wenn ungeübte Beobachter stereoskopische Photographien betrachten, oft genug schwer herauszubringen, ob sie die eigentümliche Täuschung, die das Instrument gibt, erkennen oder nicht.

Wir sehen also, wie hierbei die Erinnerungsbilder aus früheren Erfahrungen zusammenwirken mit gegenwärtigen Sinnesempfindungen, um ein Anschauungsbild hervorzubringen, welches sich unserem Wahrnehmungsvermögen mit zwingender Kraft aufdrängt, ohne daß darin für das Bewußtsein sich trennt, was durch Erinnerung, was durch gegenwärtige Wahrnehmung gegeben ist.

Noch schlagender ist der Einfluß des Verständnisses der Sinnesempfindungen, wenn in einzelnen Fällen, namentlich bei unvollkommener Beleuchtung, ein Gesichtsbild im Anfange unverständlich ist, weil wir ihm nicht die richtigen Tiefendimensionen zu geben wissen, wenn wir z. B. irgend ein fernes Licht für nah, oder ein nahes für fern halten. Plötzlich fällt uns ein, was es ist, sogleich entwickelt sich unter dem Einflusse des richtigen Verständnisses auch das richtige Anschauungsbild in seiner vollen Energie, und wir sind nicht imstande, von diesem zu der früheren unvollkommenen Anschauung zurückzukehren.

Sehr häufig kommt dies namentlich bei komplizierten stereoskopischen Zeichnungen von Kristallformen und anderen vor, die in vollkommener sinnlicher Klarheit zur Anschauung kommen, sobald es gelungen ist, das richtige Verständnis erst einmal zu gewinnen.

Dergleichen Erfahrungen, die jeder Leser gelegentlich gemacht haben wird, beweisen, daß die aus der Erfahrung hergeleiteten Momente in den Sinneswahrnehmungen sich mit eben solcher zwingenden Kraft geltend machen können, wie die aus gegenwärtigen Empfindungen hergeleiteten, und es ist dies auch von allen den Beobachtern, die sich eingehend mit der Theorie der Sinneswahrnehmungen beschäftigt haben, immer eingeräumt worden, selbst von denen, welche geneigt sind, der Erfahrung so wenig Spielraum, als möglich, einzuräumen.

Daher muß jedenfalls die Möglichkeit zugegeben werden, daß auch in dem, was dem Erwachsenen als unmittelbare sinnliche Anschauung erscheint, noch eine Menge von einzelnen Momenten stecken, die in der Tat Produkt der Erfahrung sind, obgleich es vorläufig schwer ist, hier die Grenze zu ziehen.

Ich glaube nun, daß unsere bisherigen Erfahrungen uns berechtigen, den Satz aufzustellen, daß keine unzweifelhaft gegenwärtige Empfindung durch einen Akt des Verständnisses beseitigt und überwunden werden kann, sondern wenn wir auch noch so gut erkennen, daß dieselbe auf irgend eine anomale Weise zustande gekommen sei, so schwindet doch die Sinnestäuschung nicht durch das Verständnis des Vorgangs. Wir können die Aufmerksamkeit von Empfindungen ablenken, namentlich, wenn es schwache und gewohnte Empfindungen sind, aber so wie wir auf diejenigen Verhältnisse der Außenwelt merken,

die mit diesen Empfindungen in Verbindung stehen, werden wir gezwungen sein, dieselben zu bemerken. So können wir die Temperaturempfindung unserer Haut, wenn sie nicht sehr lebhaft ist, und die Berührungsempfindungen, welche unsere Kleider verursachen, vergessen, solange wir uns mit ganz anderen Dingen beschäftigen. Sowie wir aber unsere Aufmerksamkeit darauf lenken, ob es warm oder kalt sei, werden wir nicht imstande sein, das Gefühl von Wärme in das von Kälte zu verwandeln, etwa, weil wir wissen, daß es herrührt von anstrengender Bewegung und nicht von der Temperatur der uns umgebenden Luft. Ebensowenig schwindet der Lichtschein beim Druck auf das Auge durch bessere Einsicht in das Wesen des Prozesses, vorausgesetzt, daß wir unsere Aufmerksamkeit dem Gesichtsfelde zugewendet haben, und nicht etwa dem Ohre oder der Haut.

Andererseits können wir auch vielleicht nicht imstande sein, einen Empfindungseindruck zu isolieren, weil er eingeht in das zusammengesetzte sinnliche Zeichen eines äußeren Objekts. Dann zeigt aber die richtige Auffassung des Objekts, daß die betreffende Empfindung perzipiert und vom Bewußtsein verwendet worden ist.

Ich schließe daraus, daß *nichts in unseren Sinneswahrnehmungen als Empfindung anerkannt werden kann, was durch Momente, die nachweisbar die Erfahrung gegeben hat, im Anschauungsbilde überwunden und in sein Gegenteil verkehrt werden kann.*

Was also durch Erfahrungsmomente überwunden werden kann, werden wir selbst als Produkt der Erfahrung und Einübung zu betrachten haben. Es wird sich zeigen, daß, wenn wir dieser Regel folgen, nur die Qualitäten der Empfindung als wirkliche reine Empfindung zu betrachten sind, bei weitem die meisten Raumanschauungen aber als Produkt der Erfahrung und Einübung.

Dagegen folgt nicht, daß Anschauungen, die gegen unsere bessere bewußte Einsicht standhalten und uns als Sinnestäuschungen stehen bleiben, nicht doch auf Erfahrung und Einübung beruhen könnten. Unsere Kenntnis der Farbenveränderungen, welche die Trübung der Luft an fernen Gegenständen hervorbringt, der perspektivischen Verziehungen und des Schlagschattens beruht unzweifelhaft auf Erfahrung, und doch werden wir vor einem guten Landschaftsbilde den vollkommenen sinnlichen Eindruck der Ferne und der körperlichen Gestalt darauf befindlicher Gebäude haben, trotzdem wir wissen, daß alles auf die Leinwand gezeichnet ist.

Ebenso ist unsere Kenntnis des zusammengesetzten Klanges der Vokale jedenfalls aus der Erfahrung entnommen, und doch bekommen wir den sinnlichen Eindruck des Vokalklangs durch Zusammensetzung von einzelnen Stimmgabeltönen, wie ich dies gezeigt habe, und fassen den Klang als ein Ganzes, obgleich wir wissen, daß er in diesem Falle wirklich zusammengesetzt ist.

Hier ist nun noch zu erläutern, wie Erfahrung gegen Erfahrung auftreten, und wie Täuschung hervorgebracht werden könne durch Momente, die aus der Erfahrung hergeleitet sind, da es scheinen möchte, als könnte die Erfahrung uns nur Wahres lehren. In dieser Beziehung müssen wir näher begrenzen, was oben schon angedeutet wurde, daß wir nämlich die Sinnesempfindungen so auslegen, wie sie bei ihrer normalen Erregungsweise und beim normalen Gebrauche der Sinnesorgane entstehen.

Wir überlassen uns nämlich nicht nur passiv den auf uns eindringenden Eindrücken, sondern wir *beobachten*, d. h. wir bringen unsere Organe in

diejenigen Bedingungen, unter denen sie die Eindrücke am genausten unterscheiden können. Bei der Betrachtung eines komplizierten Objekts z. B. richten wir nacheinander unsere beiden möglichst gut akkommodierten Augen so, daß beide stets denjenigen Punkt, der unsere Aufmerksamkeit gerade auf sich lenkt, fixieren, d. h. auf der Stelle des deutlichsten Sehens abbilden, und lassen die Augen nacheinander über alle bemerkenswerten Punkte des Objekts wandern. Kommt es uns auch noch darauf an, die Gesamtgestalt des Objekts und die Verhältnisse seiner Dimensionen möglichst gut aufzufassen, so stellen wir uns so auf, daß wir ohne Bewegung des Kopfes mit den Blicken die ganze Fläche überlaufen können, und daß außerdem diejenigen Dimensionen, welche wir vergleichen wollen, möglichst symmetrisch gesehen werden. Wenn wir also ein Objekt, welches, wie z. B. ein Gebäude, überwiegend horizontale und vertikale Linien darbietet, betrachten wollen, so stellen wir uns ihm nicht leicht anders, als so gegenüber, daß die Verbindungslinie der Drehungspunkte unserer Augäpfel horizontal liegt. Diese Stellung unserer Augen können wir jeden Augenblick kontrollieren, indem wir Doppelbilder auseinanderschieben; diese liegen in dem genannten Falle horizontal nebeneinander.

Wir wählen solche bestimmte Art zu sehen, unzweifelhaft, weil wir in dieser Weise am genauesten beobachten und vergleichen können, und lernen demnach bei dieser Anwendung der Augen, die wir die normale nennen können, am besten unsere Sinnesempfindungen mit der Wirklichkeit vergleichen, und erhalten durch diese Methode also auch die richtigsten und genauesten Wahrnehmungen.

Wenn wir nun einmal aus Zwang oder Absicht eine andere Art des Betrachtens der Objekte anwenden, sie also entweder nur indirekt erblicken mit den Seitenteilen der Netzhaut, oder nicht mit beiden Augen fixieren, oder mit dem Blicke nicht wandern, oder eine ungewöhnliche Kopfhaltung anwenden, so sind wir nicht imstande, ebenso genaue Anschauungen zu bilden, wie beim normalen Gebrauche der Augen, und wir sind in solchem Falle in der Auslegung des Gesehenen nicht so geübt, wie in dem früheren Falle. Dadurch entsteht ein größerer Spielraum in der Deutung, während wir doch in der Regel uns diese Unsicherheit in der Auslegung unserer Sinneswahrnehmungen nicht klar machen. Wenn wir ein Gesichtsobjekt vor uns sehen, so müssen wir es in irgend eine bestimmte Stelle des Raums versetzen, wir können es nicht so anschauen, daß seine Lage zwischen verschiedenen Stellen des Raums zweifelhaft bliebe. Wenn nun keine Erinnerungen uns zu Hilfe kommen, so pflegen wir die Erscheinung so zu deuten, wie sie gedeutet werden müßte, wenn wir bei der normalen und genausten Art des Beobachtens denselben Eindruck erhalten hätten. So treten also gewisse Täuschungen in der Wahrnehmung ein, wenn wir den Blick den beachteten Gegenständen nicht zuwenden, sondern sie im seitlichen Teile des Gesichtsfeldes haben, oder wenn wir den Kopf sehr schief halten, oder wenn wir das Objekt nicht mit beiden Augen sogleich fixieren. Es ist ferner die Übereinstimmung der Bilder auf beiden Netzhäuten am konstantesten und regelmäßigsten, wenn wir ferne Objekte betrachten, und der Umstand, daß wir dabei in der Regel den horizontalen Fußboden im untern Teile des Gesichtsfeldes haben, scheint die Vergleichung der Sehfelder beider Augen in eigentümlicher Weise zu beeinflussen. So beurteilen wir die Lage naher Objekte nicht ganz richtig, wenn wir sie mit merklich nach oben und und unten geneigten Blicken betrachten, sondern deuten die dargebotenen

Netzhautbilder dann gerade so, als wären sie bei geradeaus gerichteten Blicken entstanden und so fort. Beispiele dieser Art werden wir viele finden. Wir sind eben auf die Deutung der Perzeptionen nicht bei jeder Richtung der Augen gleich gut eingeübt, sondern nur für diejenigen, welche die genauesten und in sich am besten übereinstimmenden Wahrnehmungen erlauben und übertragen auf alle Fälle, was wir in den letztgenannten Fällen gelernt haben.

Nun ist nicht selten die Ähnlichkeit eines solchen Gesichtseindruckes mit einem der möglichen Eindrücke des normalen Beobachtens nicht so überwiegend und schlagend, daß nicht mehrfache andere Vergleichungen und dementsprechende Deutungen jenes Eindrucks möglich wären. In solchen Fällen schwankt die Auslegung entweder so, daß derselbe Beobachter nacheinander bei unveränderten Netzhautbildern verschiedene Anschauungsbilder vor sich sieht, in welchem Falle das Schwanken leicht zu erkennen ist, oder so, daß der eine Beobachter mehr der einen Vergleichung und Deutung zuneigt, ein anderer der anderen. Durch diesen Umstand ist viel Streit entstanden in der physiologischen Optik, weil jeder Beobachter geneigt war, seine Anschauung, die er bei möglichst sorgfältiger Beobachtung erhielt, für die allein gültige zu halten. Wenn wir aber zu den Beobachtern das Vertrauen haben dürfen, daß sie sorgfältig und ohne Voreingenommenheit beobachtet haben und zu beobachten verstanden, so müssen wir in solchen Fällen nicht eine von den sich entgegenstehenden Deutungen der Gesichtserscheinung als die allein richtige festhalten, wozu namentlich diejenigen geneigt sind, welche die Entstehung der Anschauungsbilder hauptsächlich aus angeborenen Momenten herzuleiten suchen. Man muß vielmehr als Tatsache anerkennen, daß verschiedene Anschauungsbilder in einem solchen Falle entwickelt werden können, und vielmehr nach den Umständen suchen, die die Entscheidung für das eine oder andere geben.

Freilich stoßen wir hier auf eine Schwierigkeit, die in den andern Teilen der Naturwissenschaften nicht besteht; wir sind nämlich in vielen solchen Fällen durchaus auf die Aussagen der einzelnen Beobachter beschränkt, ohne imstande zu sein, sie durch eigene Beobachtung zu kontrollieren. Es zeigen sich in diesem Gebiete eine Menge Eigentümlichkeiten, vielleicht zum Teil durch den Bau der Augen, zum Teil durch die gewöhnte Art, die Augen zu gebrauchen, zum Teil auch wohl durch frühere Eindrücke und Anschauungen bedingt. Solche Eigentümlichkeiten und ihre Folgen kann natürlich nur der beobachten, der sie besitzt, und kein anderer kann darüber absprechen. Andererseits ist das Beobachten in diesem Gebiete gar nicht so leicht, wie man zunächst meinen möchte. Selbst nur das feste Fixieren eines Punktes für längere Zeit, während man im indirekten Sehen beobachtet, die Beherrschung der Aufmerksamkeit, die Abstraktion von den gewöhnlichen objektiven Deutungen des Sinneseindrucks, die Schätzung der Farbenunterschiede und der räumlichen Unterschiede im Gesichtsfelde. Alles dies erfordert große Übung und eine Menge der hierher gehörigen Tatsachen können deshalb nicht einmal ohne vorgängige lange Übung in physiologisch-optischen Beobachtungen beobachtet werden, selbst nicht von Männern, die in andern Arten von Beobachtungen wohl geübt sind. In vielen Punkten ist man also auf die Beobachtungen sehr weniger Individuen reduziert, und es wird deshalb bei abweichenden Beobachtungsresultaten eines andern in diesem Gebiete viel schwerer, als in irgend einem andern, richtig zu beurteilen, ob bei einer solchen Beobachtung nicht Nebeneinflüsse mitgewirkt haben. Ich muß deshalb den Leser von vornherein darauf aufmerksam machen,

daß möglicherweise vieles, was er in den folgenden Kapiteln etwa Neues finden wird, auf individuellen Eigentümlichkeiten meiner eigenen Augen beruhen mag, und ich konnte unter diesen Umständen eben nichts tun, als die Tatsachen, wie sie meine eigenen Augen mir zeigen, möglichst sorgfältig beobachten und ihren Zusammenhang zu ermitteln suchen. Wo andere Beobachter abweichendes gefunden haben, habe ich es bemerkt. Wie weit verbreitet aber die eine oder andere Art des Sehens sei, wird erst die Zukunft lehren können.

Je weniger ähnlich übrigens die Gesichtseindrücke den normal vorkommenden sind, desto schwankender wird der Regel nach ihre Deutung, was bei der von mir durchgeführten Ansicht sich als eine natürliche Konsequenz ergibt und wesentlich charakteristisch für die Wirksamkeit psychischer Einflüsse ist.

Da wir überhaupt bisher von der Natur der psychischen Vorgänge so gut wie nichts wissen, sondern nur eine Reihe von Tatsachen kennen, wird es nicht auffallen, wenn wir auch von der Entstehung der Sinneswahrnehmungen keine wirkliche Erklärung geben können. Die empiristische Theorie sucht nachzuweisen, daß zu ihrer Entstehung wenigstens keine andern Kräfte nötig sind, als die bekannten Fähigkeiten unserer Seele, wenn auch diese selbst dabei ganz unerklärt bleiben. Da es im allgemeinen eine zweckmäßige Regel für die naturwissenschaftliche Forschung ist, keine neuen Hypothesen zu machen, solange die bekannten Tatsachen zur Erklärung ausreichend erscheinen und die Notwendigkeit neuer Annahmen nicht erwiesen ist, so habe ich geglaubt, die empiristische Ansicht im wesentlichen bevorzugen zu müssen. Die nativistische Theorie gibt noch weniger eine Erklärung für die Entstehung unserer Anschauungsbilder, indem sie mitten hineinspringt in die Sache mit der Annahme, daß gewisse räumliche Anschauungsbilder direkt erzeugt würden durch einen angeborenen Mechanismus, wenn gewisse Nervenfasern gereizt würden. In den älteren Formen dieser Theorie wurde eine Selbstbeobachtung der Netzhaut vorausgesetzt, indem wir von der Form dieser Membran und der Lage der einzelnen Nervenenden in ihr angeborene Kenntnis haben sollten. In der neueren, namentlich von E. Hering durchgeführten Form dieser Ansicht ist es ein vorgestellter subjektiver Sehraum, in welchen die Empfindungen der einzelnen Netzhautfasern nach gewissen angeborenen Gesetzen eingetragen werden sollen. In dieser Theorie ist also nicht bloß die Kantsche Behauptung festgehalten, daß die allgemeine Raumanschauung eine ursprüngliche Form unseres Vorstellens sei, sondern es sind gewisse spezielle Raumanschauungen als angeboren vorausgesetzt.

Die naturalistische Ansicht ist auch wohl spezieller Identitätstheorie genannt worden, weil in ihr die vollständige Verschmelzung der Eindrücke der korrespondierenden Stellen beider Netzhäute behauptet werden muß. Die empiristische Theorie dagegen ist als Projektionstheorie* bezeichnet, weil nach derselben die Anschauungsbilder der Objekte mittels psychischer Vorgänge in den Raum projiziert werden. Ich möchte den Namen vermeiden, weil vielfach sowohl von Anhängern als Gegnern ungebührliche Wichtigkeit darauf gelegt worden ist, daß diese Projektion in Richtung der Richtungslinien geschehen sollte, was jedenfalls nicht die richtige Bezeichnung des psychischen Vorgangs war, und auch, wenn man diese Konstruktion nur für die physiologische Be-

* Vgl. die Bemerkungen über die an das Wort Projektionstheorie geknüpften Mißverständnisse im Anhangskapitel I. K.

schreibung des Vorgangs gelten lassen wollte, in sehr vielen Fällen unrichtig sein würde.

Ich erkenne an, daß bei dem gegenwärtigen Stande der Wissenschaft eine Widerlegung der nativistischen Theorie nicht möglich ist; ich selbst bevorzuge die entgegengesetzte Ansicht, weil die nativistische Theorie meines Erachtens:

1) eine nicht notwendige Hypothese einführt,
2) ihre Konsequenzen bisher noch immer räumliche Anschauungsbilder ergeben, die nur in den wenigsten Fällen mit der Wirklichkeit und unseren unzweifelhaft vorhandenen richtigen Gesichtsbildern von derselben übereinstimmen, wie sich dies später im einzelnen zeigen wird. Die Anhänger dieser Theorie sind deshalb gezwungen, die sehr mißliche Annahme zu machen, daß die nach ihnen vorhandenen ursprünglichen Raumempfindungen fortdauernd durch unsere aus der Erfahrung gesammelten Kenntnisse verbessert und überwunden werden. Nach der Analogie aller andern Erfahrungen müßten wir aber erwarten, daß die überwundenen Empfindungen dann wenigstens der Anschauung gegenwärtig blieben, wenn auch als anerkannte Trugbilder. Das ist aber nicht der Fall.
3) ist nicht einzusehen, was die Annahme solcher ursprünglicher „Raumempfindungen“ helfen solle zur Erklärung unserer Gesichtswahrnehmungen, wenn schließlich von den Anhängern dieser Theorie für die ungeheure Mehrzahl der Fälle angenommen werden muß, daß dieselben überwunden werden müssen durch unsere aus der Erfahrung entnommene bessere Kenntnis. Dann ist es doch, wie mir scheint, viel leichter und einfacher zu begreifen, daß sämtliche räumliche Anschauungen bloß durch die Erfahrung zustande kommen, ohne daß diese gegen angeborene, der Regel nach falsche, Anschauungsbilder zu kämpfen hat.

Dies zur Rechtfertigung meines Standpunkts. Da ein solcher doch gewählt werden mußte, um wenigstens übersichtliche Ordnung in das Chaos der Erscheinungen bringen zu können, glaubte ich den gewählten bevorzugen zu müssen, ich hoffe jedoch, daß derselbe keinen Einfluß auf die treue Beobachtung und Beschreibung der Tatsachen gehabt hat.

Um Mißverständnisse meiner Meinung zu verhüten, und dem natürlichen Bewußtsein derjenigen Leser, welche über ihre Sinneswahrnehmungen noch nicht reflektiert haben, dieselbe zugänglicher zu machen, lasse ich noch folgende Erläuterungen folgen.

Ich habe oben die Sinnesempfindungen nur als Symbole für die Verhältnisse der Außenwelt bezeichnet und ihnen jede Art der Ähnlichkeit oder Gleichheit mit dem, was sie bezeichnen, abgesprochen. Wir rühren damit an die viel bestrittene Frage, wie weit unsere Vorstellungen überhaupt mit ihren Objekten übereinstimmen, ob sie, wie man es ausdrückte, wahr oder falsch seien. Eine solche Übereinstimmung ist bald behauptet worden, bald geleugnet. Man nahm ihr zuliebe eine prästabilierte Harmonie zwischen der Natur und dem Geiste an, oder man behauptete die Identität der Natur und des Geistes, indem man die Natur als Produkt der Tätigkeit eines allgemeinen Geistes ansah, dessen Ausfluß andererseits wieder der menschliche Geist sein sollte. Diesen Ansichten schließt sich die nativistische Theorie der Raumanschauungen insofern an, als sie durch einen angeborenen Mechanismus und eine gewisse prästabilierte

Harmonie Anschauungsbilder entstehen läßt, die, wenn auch in ziemlich unvollkommener Weise, der Wirklichkeit entsprechen sollen.

Oder aber man leugnete die Übereinstimmung der Vorstellungen mit ihrem Objekte, und erklärte dieselben deshalb für Täuschungen, womit man denn konsequenter Weise auch die Möglichkeit alles Wissens von irgendwelchen Objekten leugnen mußte. So bei den englischen Sensualisten des vorigen Jahrhunderts. Ich will übrigens hier nicht auf die Auseinandersetzung der Meinungen der einzelnen Philosophenschulen über diese Frage eingehen, weil das ein für diesen Ort viel zu weitläufiges Geschäft wäre, sondern mich darauf beschränken zu erörtern, wie sich meines Erachtens nach der Naturforscher diesen Streitigkeiten gegenüber zu verhalten hat.

Unsere Anschauungen und Vorstellungen sind Wirkungen, welche die angeschauten und vorgestellten Objekte auf unser Nervensystem und unser Bewußtsein hervorgebracht haben. Jede Wirkung hängt ihrer Natur nach ganz notwendig ab, sowohl von der Natur des Wirkenden, als von der desjenigen, auf welches gewirkt wird. Eine Vorstellung verlangen, welche unverändert die Natur des Vorgestellten wiedergäbe, also in absolutem Sinne wahr wäre, würde heißen eine Wirkung zu verlangen, welche vollkommen unabhängig wäre von der Natur desjenigen Objekts, auf welches eingewirkt wird, was ein handgreiflicher Widerspruch wäre. So sind also unsere menschlichen Vorstellungen und so werden alle Vorstellungen irgendeines intelligenten Wesens, welches wir uns denken können, Bilder der Objekte sein, deren Art wesentlich mitabhängt von der Natur des vorstellenden Bewußtseins und von deren Eigentümlichkeiten mitbedingt ist.

Ich meine daher, daß es gar keinen möglichen Sinn haben kann, von einer anderen Wahrheit unserer Vorstellungen zu sprechen, als von einer praktischen. Unsere Vorstellungen von den Dingen können gar nichts anderes sein, als Symbole, natürlich gegebene Zeichen für die Dinge, welche wir zur Regelung unserer Bewegungen und Handlungen benutzen lernen. Wenn wir jene Symbole richtig zu lesen gelernt haben, so sind wir imstande, mit ihrer Hilfe unsere Handlungen so einzurichten, daß dieselben den gewünschten Erfolg haben, d. h. daß die erwarteten neuen Sinnesempfindungen eintreten. Eine andere Vergleichung zwischen den Vorstellungen und den Dingen gibt es nicht nur in der Wirklichkeit nicht — darüber sind alle Schulen einig — sondern eine andere Art der Vergleichung ist gar nicht denkbar und hat gar keinen Sinn. Dies letztere ist der Punkt, auf den es ankommt, und den man einsehen muß, um aus dem Labyrinthe widerstreitender Meinungen herauszukommen. Zu fragen, ob die Vorstellung, welche ich von einem Tische, seiner Gestalt, Festigkeit, Farbe, Schwere usw. habe, an und für sich, abgesehen von dem praktischen Gebrauche, den ich von dieser Vorstellung machen kann, wahr sei und mit dem wirklichen Dinge übereinstimme, oder ob sie falsch sei und auf einer Täuschung beruhe, hat gerade so viel Sinn, als zu fragen, ob ein gewisser Ton rot, gelb oder blau sei. Vorstellung und Vorgestelltes sind offenbar zwei ganz verschiedenen Welten angehörig, welche ebensowenig eine Vergleichung untereinander zulassen als Farben und Töne, oder als die Buchstaben eines Buches mit dem Klang des Wortes, welches sie bezeichnen.

Wenn zwischen der Vorstellung in dem Kopfe eines Menschen A und dem vorgestellten Dinge irgendeine Art von Ähnlichkeit von Übereinstimmung wäre, so würde eine zweite Intelligenz B, welche beide das Ding und seine Vorstellung

im Kopfe von A sich nach den gleichen Gesetzen vorstellte, irgendeine Ähnlichkeit zwischen ihnen finden oder doch wenigstens denken können. Denn Gleiches in gleicher Weise abgebildet (vorgestellt) müßte doch gleiche Bilder (Vorstellungen) geben. Nun frage ich, welche Ähnlichkeit soll man sich denken zwischen dem Prozeß im Gehirn, welcher die Vorstellung eines Tisches begleitet, und dem Tische selbst. Soll man sich die Gestalt des Tisches von elektrischen Strömen nachgezeichnet denken, und wenn der Vorstellende sich vorstellte, daß er um den Tisch herumgehe, soll dazu noch ein Mensch mittels elektrischer Ströme gezeichnet werden. Perspektivische Projektionen der Außenwelt in den Gehirnhemisphären, wie sie wohl angenommen sind, genügen offenbar nicht, die Vorstellung von einem körperlichen Objekte darzustellen. Und gesetzten Fall eine kühne Phantasie schreckte vor einer solchen und ähnlichen Hypothesen nicht zurück, so wäre ein solches elektrisches Abbild des Tisches im Gehirn eben ein zweites körperliches Objekt, welches wahrgenommen werden müßte, aber keine Vorstellung vom Tische. Indessen sind es nicht gerade die Anhänger materialistischer Meinungen, welche der aufgestellten Behauptung zu widersprechen suchen werden, sondern die Anhänger spiritualistischer Meinungen. Und für diese sollte ich meinen, läge das Verhältnis im Gegenteil noch klarer da. Welche mögliche Ähnlichkeit soll denn die Vorstellung, eine Veränderung in der unkörperlichen, räumlich nicht ausgedehnten Seele mit dem im Raume ausgedehnten Körper des Tisches haben können. Es ist von seiten der spiritualistischen Philosophen, soviel ich weiß, nicht einmal jemals auch nur eine Hypothese oder eine Phantasie versucht worden, um das anzudeuten, und es liegt auch in der Natur dieser Ansicht, daß so etwas gar nicht versucht werden kann.

Was zunächst die Eigenschaften der Objekte der Außenwelt betrifft, so zeigt eine leichte Überlegung, daß alle Eigenschaften, die wir ihnen zuschreiben können, nur Wirkungen bezeichnen, welche sie entweder auf unsere Sinne oder auf andere Naturobjekte ausüben. Farbe, Klang, Geschmack, Geruch, Temperatur, Glätte, Festigkeit gehören der ersteren Klasse an, sie bezeichnen Wirkungen auf unsere Sinnesorgane. Glätte und Festigkeit bezeichnen den Grad des Widerstands, den die berührten Körper entweder der gleitenden Berührung oder dem Drucke der Hand darbieten. Statt der Hand können aber auch andere Naturkörper eintreten, ebenso für die Prüfung anderer mechanischer Eigenschaften, der Elastizität und Schwere. Die chemischen Eigenschaften beziehen sich ebenfalls auf Reaktionen, d. h. Wirkungen, welche der betrachtete Naturkörper auf andere ausübt. Ebenso ist es mit den anderen physikalischen Eigenschaften der Körper, den optischen, elektrischen, magnetischen. Überall haben wir es mit Wechselbeziehungen verschiedener Körper aufeinander zu tun, mit Wirkungen aufeinander, welche von den Kräften abhängen, die verschiedene Körper aufeinander ausüben. Denn alle Naturkräfte sind Kräfte, welche ein Körper auf den anderen ausübt. Wenn wir uns die bloße Materie ohne Kräfte denken, so ist sie auch ohne Eigenschaften, abgesehen von ihrer verschiedenen Verteilung im Raum und ihrer Bewegung. Alle Eigenschaften der Naturkörper kommen deshalb auch erst zutage, wenn wir sie in die entsprechende Wechselwirkung mit anderen Naturkörpern oder mit unsern Sinnesorganen setzen. Da aber solche Wechselwirkung in jedem Augenblicke eintreten kann, beziehlich auch durch unseren Willen in einem beliebigen Augenblicke herbeigeführt werden kann, und wir dann immer die eigentümliche Art der Wechselwirkung

eintreten sehen, so schreiben wir den Objekten eine dauernde und stets zur Wirksamkeit bereite Fähigkeit zu solchen Wirkungen zu. Diese dauernde Fähigkeit nennen wir Eigenschaft.

Daraus geht nun hervor, daß in Wahrheit die Eigenschaften der Naturobjekte, trotz dieses Namens, gar nichts dem einzelnen Objekte an und für sich eigenes bezeichnen, sondern immer eine Beziehung zu einem zweiten Objekte (einschließlich unserer Sinnesorgane) bezeichnen. Die Art der Wirkung muß natürlich immer von den Eigentümlichkeiten sowohl des wirkenden Körpers abhängen, als von denen des Körpers, auf welchen gewirkt wird. Darüber sind wir auch keinen Augenblick in Zweifel, wenn wir von solchen Eigenschaften der Körper reden, welche sich zeigen, wenn der eine auf einen anderen ebenfalls der Außenwelt angehörigen Körper wirkt, z. B. bei den chemischen Reaktionen. Bei den Eigenschaften dagegen, welche auf Wechselbeziehungen der Dinge zu unsern Sinnesorganen beruhen, sind die Menschen von jeher geneigt gewesen, es zu vergessen, daß wir es auch hier mit der Reaktion gegen ein besonderes Reagens, nämlich unseren Nervenapparat zu tun haben, und daß auch Farbe, Geruch und Geschmack, Gefühl der Wärme und Kälte Wirkungen sind, die ganz wesentlich von der Art des Organs, auf welches gewirkt wird, abhängen. Allerdings sind die Reaktionen der Naturobjekte auf unsere Sinne die am häufigsten und am allgemeinsten wahrgenommenen, sie haben für unser Wohlsein und für unsere Behaglichkeit die überwiegendste Wichtigkeit; das Reagens, an welchem wir sie zu erproben haben, ist uns von Natur mitgegeben, aber dadurch wird das Verhältnis nicht anders.

Die Frage zu stellen, ob der Zinnober wirklich rot sei, wie wir ihn sehen, oder ob dies nur eine sinnliche Täuschung sei, ist deshalb sinnlos. Die Empfindung von Rot ist die normale Reaktion normal gebildeter Augen für das von Zinnober reflektierte Licht. Ein Rotblinder wird den Zinnober schwarz oder dunkelgraugelb sehen; auch dies ist die richtige Reaktion für sein besonders geartetes Auge. Er muß nur wissen, daß sein Auge eben anders geartet ist, als das anderer Menschen. An sich ist die eine Empfindung nicht richtiger und nicht falscher als die andere, wenn auch die Rotsehenden eine große Majorität für sich haben. Überhaupt existiert die rote Farbe des Zinnobers nur, insofern es Augen gibt, die denen der Majorität der Menschen ähnlich beschaffen sind. Genau mit demselben Rechte ist es eine Eigenschaft des Zinnobers, schwarz zu sein, nämlich für die Rotblinden. Überhaupt ist das vom Zinnober zurückgeworfene Licht an sich durchaus nicht rot zu nennen, es ist nur für bestimmte Arten von Augen rot. Wenn wir von Eigenschaften der Körper sprechen, die sie in bezug auf andere Körper der Außenwelt haben, vergessen wir nicht in der Sprache auch den Körper zu bezeichnen, in bezug auf welchen die Eigenschaft vorhanden ist. Wir sagen: „Blei ist löslich in Salpetersäure, es ist nicht löslich in Schwefelsäure". Wenn wir bloß sagen wollten: „Blei ist löslich," so würden wir sogleich bemerken, daß dies eine unvollständige Behauptung ist, und würden sogleich fragen müssen, worin es löslich sei. Wenn wir aber sagen „Zinnober ist rot", so versteht es sich implizite von selbst, daß er für unsere Augen rot ist, und für die Augen anderer Menschen, welche wir als gleich beschaffen voraussetzen. Wir glauben das nicht erwähnen zu brauchen, und deshalb vergessen wir es auch wohl, und können verleitet werden zu glauben, die Röte sei eine dem Zinnober, oder dem von ihm reflektierten Lichte ganz unabhängig von unseren Sinnesorganen zukommende Eigen-

schaft. Etwas anderes ist es, wenn wir behaupten, daß die Wellenlängen des vom Zinnober zurückgeworfenen Lichtes eine gewisse Länge haben. Das ist eine Aussage, die wir unabhängig von der besonderen Natur unseres Auges machen können, bei der es sich dann aber auch nur um Beziehungen zwischen der Substanz und den verschiedenen Ätherwellensystemen handelt.

Die einzige Beziehung, in welcher eine wirkliche Übereinstimmung unserer Wahrnehmungen mit der Wirklichkeit stattfinden kann, ist die Zeitfolge der Ereignisse mit ihren verschiedenen Eigentümlichkeiten. Die Gleichzeitigkeit, die Folge, die regelmäßige Wiederkehr der Gleichzeitigkeit oder Folge kann in den Empfindungen ebenso stattfinden, wie in den Ereignissen. Die äußeren Ereignisse, wie ihre Wahrnehmungen, gehen in der Zeit vor sich, also können auch die Zeitverhältnisse der letzteren das getreue Abbild der Zeitverhältnisse der ersteren sein. Die Empfindung des Donners im Ohre folgt auf die Empfindung des Blitzes im Auge ebenso, wie die Schallerschütterung der Luft, welche durch die elektrische Entladung verursacht ist, später am Orte des Beobachters ankommt, als die Erschütterung des Lichtäthers. Doch ist hier allerdings zu bemerken, daß die Zeitfolge der Empfindungen insofern kein ganz getreues Abbild der Zeitfolge der äußeren Ereignisse ist, als die Leitung von den Sinnesorganen zum Gehirn Zeit, und zwar von verschiedenen Organen aus verschiedene Zeit kostet. Dazu kommt nun noch für Auge und Ohr die Zeit, welche Licht und Schall brauchen, um bis zum Organ zu gelangen. So sehen wir denn die Fixsterne jetzt, wie sie vor einer verschieden langen Reihe von Jahren waren.

Was die Abbildung der Raumverhältnisse betrifft, so geschieht eine solche allerdings an den peripherischen Nervenenden im Auge und an der tastenden Haut in einem gewissen Grade, aber doch nur in beschränkter Weise, da das Auge nur perspektivische Flächenabbildungen gibt, die Hand die objektive Fläche an der ihr möglichst kongruent gestalteten Körperoberfläche abbildet. Ein direktes Bild einer nach drei Dimensionen ausgedehnten Raumgröße gibt weder das Auge noch die Hand. Erst durch die Vergleichung der Bilder beider Augen, oder durch Bewegung des Körpers, beziehlich der Hand, kommt die Vorstellung von Körpern zustande. Da nun unser Gehirn drei Dimensionen hat, so bleibt der Phantasie freilich ein weiter Spielraum, sich auszumalen, durch welchen Mechanismus etwa im Gehirn körperlich ausgedehnte Abbilder der äußeren körperlichen Gegenstände entstehen. Aber eine Notwendigkeit oder auch nur eine Wahrscheinlichkeit für eine solche Annahme sehe ich nicht ein. Die Vorstellung eines räumlich ausgedehnten Körpers z. B. eines Tisches schließt ein eine Masse von einzelnen Beobachtungen. Es liegt darin einbegriffen die ganze Reihe von Bildern, welche dieser Tisch mir gewähren würde, wenn ich ihn von verschiedenen Seiten und aus verschiedenen Entfernungen her betrachten würde, ferner die ganze Reihe von Tasteindrücken, welche ich erhalten würde, wenn ich meine Hände nacheinander an die verschiedenen Stellen seiner Oberfläche legen würde. Eine solche Vorstellung von einem einzelnen individuellen Körper ist also in der Tat schon ein Begriff, welcher eine unendliche Anzahl von einzelnen in der Zeit aufeinander folgenden Anschauungen unter sich begreift, die alle aus ihm abgeleitet werden können, ebenso wie der Gattungsbegriff „Tisch“ wiederum alle einzelnen Tische in sich begreift, und deren gemeinsame Eigentümlichkeiten ausspricht. Die Vorstellung eines einzelnen individuellen Tisches, welche ich in mir trage, ist richtig und

genau, wenn ich aus ihr richtig und genau herleiten kann, welche Empfindungen ich haben werde, wenn ich mein Auge und meine Hand in diese und jene bestimmte Stellung gegen den Tisch bringen werde. Welche andere Art der Ähnlichkeit zwischen einer solchen Vorstellung und dem dadurch vorgestellten Körper sein kann, weiß ich nicht zu begreifen. Jener ist das geistige Zeichen für diesen. Die Art dieses Zeichens ist nicht willkürlich von mir gewählt, sondern mir durch die Natur meiner Sinnesorgane und meines Geistes aufgedrungen. Dadurch unterscheidet sich diese Zeichensprache unserer Vorstellungen von den willkürlich gewählten Laut- und Buchstabenzeichen unserer Rede und Schrift. Eine Schrift ist richtig, wenn derjenige, welcher sie zu lesen weiß, richtige Vorstellungen danach bildet, und die Vorstellung von einem Dinge ist richtig für denjenigen, welcher danach richtig vorauszubestimmen weiß, welche sinnlichen Eindrücke er von dem Dinge erhalten wird, wenn er sich in bestimmte äußere Beziehungen zu ihm setzt. Übrigens ist es ganz gleichgültig, welcher Art diese geistigen Zeichen sind, wenn sie nur ein hinreichend mannigfaltiges und geordnetes System bilden; ebeno wie es gleichgültig ist, wie die Worte einer Sprache lauten, wenn nur eine hinreichende Anzahl vorhanden ist und hinreichende Mittel ihre grammatikalischen Beziehungen zueinander zu bezeichnen.

Man muß sich bei dieser Ansicht von der Sache nur nicht die Behauptung unterschieben lassen, daß hiernach alle unsere Vorstellungen von den Dingen falsch seien, weil sie den Dingen nicht gleich sind, und daß wir demnach von dem wahren Wesen der Dinge nichts wissen könnten. Daß sie den Dingen nicht gleich sein können, liegt in der Natur des Wissens. Die Vorstellungen sollen doch nur Abbilder der Dinge sein, und jedes Bild ist das Bild eines Dinges nur für denjenigen, der es zu lesen weiß, der sich mit Hilfe des Bildes eine Vorstellung vom Dinge machen kann. Jedes Bild ist seinem Gegenstande in einer Beziehung ähnlich, in allen anderen unähnlich, sei es nun ein Gemälde, eine Statue, die musikalische oder dramatische Darstellung einer Gemütsstimmung usw. So sind die Vorstellungen von der Außenwelt Bilder der gesetzmäßigen Zeitfolge der Naturereignisse, und wenn sie nach den Gesetzen unseres Denkens richtig gebildet sind, und wir sie durch unsere Handlungen richtig in die Wirklichkeit wieder zurückzuübersetzen vermögen, sind die Vorstellungen, welche wir haben, auch für unser Denkvermögen die einzig wahren; alle anderen würden falsch sein.

Ich meine, es ist deshalb auch ein Mißverständnis, nach einer prästabilierten Harmonie zwischen den Gesetzen des Denkens und denen der Natur suchen zu wollen, nach einer Identität zwischen Natur und Geist, oder wie man es sonst nennen will. Es kann ein Zeichensystem mehr oder weniger vollständig und zweckmäßig sein; danach wird es leichter oder weniger leicht anzuwenden, genauer in der Bezeichnung oder ungenauer sein, wie wir dies an den verschiedenen Sprachen sehen, aber übrigens wird sich jedes mehr oder weniger gut der Sache anbequemen lassen. Wenn es keine Anzahl ähnlicher Naturobjekte in der Welt gäbe, würde uns unsere Fähigkeit, Gattungsbegriffe zu bilden, freilich nichts helfen; wenn es keine festen Körper gäbe, würden unsere geometrischen Fähigkeiten unentwickelt und ungebraucht bleiben müssen, ebenso wie das körperliche Auge uns nicht helfen würde in einer Welt, wo kein Licht existierte. Wenn man in diesem Sinne von einer Anpassung unserer Denkgesetze an die Gesetze der Natur reden will, können wir es gelten lassen;

offenbar braucht eine solche Anpassung aber weder vollständig noch genau zu sein. Das Auge ist ein praktisch äußerst brauchbares Organ, obgleich es weder in allen Entfernungen deutlich sehen, noch Äthervibrationen aller Art wahrnehmen, noch die Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, genau in einen Punkt vereinigen kann. Unsere Verstandestätigkeiten sind an die Tätigkeit eines körperlichen Organs, des Gehirns, gebunden, wie das Sehvermögen an das Auge. Der menschliche Verstand bezwingt wunderbar viel in der Welt, und bringt es unter ein strenges kausales Gesetz; ob er notwendig alles müsse bezwingen können, was in der Welt bestehen und geschehen könne, dafür scheint mir keine Garantie zu existieren.

Wir haben nun noch zu reden von der Art, wie unsere Vorstellungen und Wahrnehmungen durch induktive Schlüsse gebildet werden. Das Wesen unserer Schlüsse finde ich am besten auseinandergesetzt in der Logik von Stuart Mill. Sobald der Vordersatz des Schlusses nicht ein Gebot ist, welches durch fremde Autorität für unser Handeln oder Glauben aufgestellt ist, sondern ein Satz, der sich auf die Wirklichkeit bezieht, und also nur das Resultat der Erfahrung sein kann, so lehrt uns der Schluß in der Tat nichts Neues, was wir nicht schon gewußt haben, ehe wir ihn machten. Also z. B.

Major: Alle Menschen sind sterblich.
Minor: Cajus ist ein Mensch.
Conclusio: Cajus ist sterblich.

Den Major, daß alle Menschen sterblich sind, welches ein Erfahrungssatz ist, dürfen wir eigentlich nicht aufstellen, ehe wir nicht wissen, ob die Conclusio richtig ist, daß auch Cajus, der ein Mensch ist, gestorben sei, oder sterben werde. Wir müssen also des Schlußsatzes sicher sein, ehe wir noch den Major, durch welchen wir ihn beweisen wollen, aufstellen können. Das scheint also ein Herumgehen im Zirkel zu sein. Das wahre Verhältnis ist offenbar das: Wir und andere Menschen haben bisher ausnahmslos beobachtet, daß kein Mensch über ein gewisses Alter hinaus gelebt hat. Die Beobachtenden haben diese Erfahrungen, daß Lucius, Flavius, und wie die einzelnen Menschen sonst hießen, von denen sie es wissen, gestorben sind, in den allgemeinen Satz zusammenfaßt, daß alle Menschen sterben, und haben sich berechtigt gefühlt, weil dieses Ende in allen den Fällen regelmäßig eintrat, welche beobachtet worden sind, diesen allgemeinen Satz auch für gültig zu erklären für alle diejenigen Fälle, welche noch später zur Beobachtung kommen würden, und so bewahren wir uns den Schatz von Erfahrungen, den wir oder andere Beobachter in diesem Punkte bisher gemacht haben, in Form des allgemeinen Satzes im Gedächtnisse auf, der den Major des obigen Schlusses bildet.

Es ist aber klar, daß wir zu der Überzeugung, Cajus werde sterben, auch unmittelbar, ohne in unserem Bewußtsein den allgemeinen Satz zu bilden, hätten kommen können, indem wir seinen Fall mit allen uns bekannten früheren verglichen hätten, und das ist sogar die gewöhnlichere und ursprünglichere Art, durch Induktion zu schließen. Daß dergleichen Schlüsse ohne bewußte Reflexion entstehen, indem in unserem Gedächtnisse das Gleichartige der früher beobachteten Fälle sich aneinanderfügt und sich gegenseitig verstärkt, zeigt sich namentlich in denjenigen Fällen von induktivem Schließen, wo es uns nicht gelingt, eine ausnahmlos geltende Regel mit genau bestimmten Grenzen ihrer Gültigkeit aus den bisherigen Erfahrungen zu abstrahieren, wie das der Fall

ist bei allen verwickelten Vorgängen. So können wir z. B. aus der Analogie früherer ähnlicher Fälle zuweilen mit ziemlicher Sicherheit voraussagen, was einer unserer Bekannten tun wird, wenn er unter gewissen Umständen sich zum Handeln entscheiden wird, weil wir seinen Charakter kennen, z. B. als ehrgeizig oder als feig, ohne daß wir doch genau anzugeben wissen, wonach wir den Grad des Ehrgeizes oder der Feigheit zu messen haben, und warum der vorhandene Grad von Ehrgeiz oder Feigheit ausreichen wird, das Handeln des Menschen so zu bestimmen, wie es unserer Erwartung nach ausfallen soll.

Bei den eigentlich sogenannten und mit Bewußtsein vollzogenen Schlüssen, wenn sie sich nicht auf Gebote, sondern auf Erfahrungssätze stützen, tun wir also in der Tat nichts anderes, als daß wir mit Überlegung und sorgfältiger Prüfung diejenigen Schritte der induktiven Verallgemeinerung unserer Erfahrungen wiederholen, welche schon vorher in schnellerer Weise ohne bewußte Reflexion ausgeführt waren, entweder von uns selbst, oder von anderen Beobachtern, denen wir vertrauen. Wenn aber auch durch die Formulierung eines allgemeinen Satzes aus unseren bisherigen Erfahrungen nichts wesentlich Neues unserem bisherigen Wissen hinzugefügt wird, so ist dieselbe doch in vieler Beziehung nützlich. Einen bestimmt ausgesprochenen allgemeinen Satz können wir viel leichter im Gedächtnisse aufbewahren und andern Menschen mitteilen, als wenn dies mit allen einzelnen Fällen geschehen müßte. Wir werden durch seine Aufstellung veranlaßt, jeden neu eintretenden Fall gerade in bezug auf die Richtigkeit jener Verallgemeinerung genau zu prüfen, wobei jede Ausnahme uns doppelt stark auffallen wird; wir werden uns eher an die Beschränkungen der Gültigkeit erinnern, wenn wir den Satz in allgemeiner Form vor uns haben, als wenn wir alle einzelnen Fälle durchlaufen müssen. Es wird also durch eine solche bewußte Formulierung des Induktionsschlusses mancherlei gewonnen für die Bequemlichkeit und Sicherheit des Verfahrens, aber es wird im wesentlichen nichts Neues hinzugefügt, was nicht schon in den ohne Reflexion ausgeführten Analogieschlüssen bestände, mittels deren wir z. B. den Charakter eines Menschen aus seinen Gesichtszügen und seinen Bewegungen beurteilen, oder nach der Kenntnis seines Charakters voraussagen, was er in einem gegebenen Falle tun wird.

Wir haben nun genau denselben Fall bei unseren Sinneswahrnehmungen. Wenn wir Erregung in denjenigen Nervenapparaten gefühlt haben, deren peripherische Enden an der rechten Seite beider Netzhäute liegen, so haben wir in millionenfach wiederholten Erfahrungen unseres ganzen Lebens gefunden, daß ein leuchtender Gegenstand nach unserer linken Seite hin vor uns lag. Wir mußten die Hand nach links hin erheben, um das Licht zu verdecken, oder das leuchtende Objekt zu ergreifen, oder uns nach links hin bewegen, um uns ihm zu nähern. Wenn also in diesen Fällen kein eigentlicher bewußter Schluß vorliegt, so ist doch die wesentliche und ursprüngliche Arbeit eines solchen vollzogen, und das Resultat desselben erreicht, aber freilich nur durch die unbewußten Vorgänge der Assoziation von Vorstellungen, die im dunklen Hintergrunde unseres Gedächtnisses vor sich geht, und deren Resultate sich daher auch unserem Bewußtsein aufdrängen, als gewonnen durch eine uns zwingende, gleichsam äußere Macht, über die unser Wille keine Gewalt hat.

Es fehlt an diesen Induktionsschlüssen, die zur Bildung unserer Sinneswahrnehmungen führen, allerdings die reinigende und prüfende Arbeit des bewußten Denkens; dessenungeachtet glaube ich sie doch ihrem eigentlichen

Wesen nach als Schlüsse, unbewußt vollführte Induktionsschlüsse, bezeichnen zu dürfen.

Ihrer Aufnahme in das bewußte Denken und ihrer Formulierung in der Normalform logischer Schlüsse widersteht nun noch ein ihnen ganz eigentümlicher Umstand, nämlich der, daß wir gar nicht näher bezeichnen können, was in uns vorgegangen ist, wenn wir eine Empfindung in einer bestimmten Nervenfaser hatten, und wodurch diese zu unterscheiden ist von entsprechenden Empfindungen in anderen Nervenfasern. Haben wir z. B. eine Lichtempfindung in gewissen Fasern des Sehnervenapparats gehabt, so wissen wir nur, daß wir eben eine Empfindung eigentümlicher Art gehabt haben, die sich von allen anderen Sinnesempfindungen und auch von allen anderen Gesichtsempfindungen unterschieden hat, und bei welcher wir immer ein lichtes Objekt nach links hin fanden. Wir können im natürlichen Zustande, und ehe wir Physiologie studiert haben, von der Empfindung nicht anders sprechen, und die Empfindung selbst für unser eigenes Vorstellen nicht begrenzen und nicht festhalten, als indem wir sie bezeichnen durch die Bedingungen, unter denen sie zustande gekommen ist. Ich muß sagen: „ich sehe etwas Helles nach links hin“; das ist der einzige Ausdruck, den ich der Empfindung geben kann. Daß wir Nerven haben, daß diese Nerven erregt worden sind, und zwar Nerven, die rechts in den Netzhäuten endigen, lernen wir erst spät durch wissenschaftliches Studium, und dadurch bekommen wir erst die Mittel, diese Art der Empfindung zu definieren unabhängig von der Art, wie sie gewöhnlich hervorgerufen wird.

Ähnlich verhält es sich bei den meisten Sinnesempfindungen. Die Geschmacks- und Geruchsempfindungen wissen wir meistenteils selbst ihrer Qualität nach nicht anders zu bezeichnen, als durch die Benennung derjenigen Körper, welche geschmeckt oder gerochen werden, einige wenige, ziemlich unbestimmte, allgemeinere Bezeichnungen abgerechnet, wie „süß“, „sauer“, „bitter“, „scharf“.

Diese Urteile, durch welche wir von unseren Sinnesempfindungen auf die Existenz einer äußeren Ursache derselben hinübergehen, können wir also auf dem gewöhnlichen Zustande unseres Bewußtseins gar nicht einmal in die Form bewußter Urteile erheben. Das Urteil, daß links von mir ein helles Objekt sei, weil die rechts in meiner Netzhaut endenden Nervenfasern sich in Erregungszustand befinden, kann jemand, der von der inneren Beschaffenheit des Auges nichts weiß, nur so aussprechen: „Links ist etwas Helles, weil ich es dort sehe.“ Und demgemäß kann auch die Erfahrung, daß, wenn ich das Auge rechts drücke, die dort endenden Nervenfasern erregt werden, vom Standpunkte der täglichen Erfahrung gar nicht anders ausgesprochen werden, als so: „Wenn ich das Auge rechts drücke, sehe ich links einen hellen Schein.“ Es fehlt jedes Mittel, die Empfindung anders zu beschreiben und mit andern früher gehabten Empfindungen zu identifizieren, als dadurch, daß man den Ort des scheinbar entsprechenden äußeren Objekts bezeichnet. Deshalb haben also diese Fälle der Erfahrung das Eigentümliche, daß man die Beziehung der Empfindung auf ein äußeres Objekt gar nicht einmal aussprechen kann, ohne sie schon in der Bezeichnung der Empfindung vorauszuschicken, und ohne das schon vorauszusetzen, von dem man erst noch reden will.

Daß wir nun, nachdem wir den physiologischen Ursprung und Zusammenhang der Sinnestäuschungen kennen gelernt haben, doch die Täuschung trotz unserer

besseren Einsicht nicht los werden können, rührt eben davon her, daß die Induktion durch eine unbewußte und unwillkürliche Tätigkeit des Gedächtnisses gebildet ist, die eben deshalb unserem Bewußtsein als eine fremde, zwingende Naturkraft erscheint. Übrigens finden wir dafür vielfältige Analogien bei allen möglichen anderen Arten des Scheines. Ich möchte sagen, daß aller Schein entsteht durch vorschnelle unreflektierte Induktionen, bei denen wir aus früheren Fällen Schlüsse auf neue Fälle ziehen, und wo die Neigung zu den falschen Schlüssen bestehen bleibt, trotz der auf bewußte Überlegung gegründeten besseren Einsicht in die Sache. Die Sonne geht jeden Abend vor unseren Augen hinter dem feststehenden Horizonte scheinbar unter, obgleich wir sehr wohl wissen, daß jene feststeht und dieser sich bewegt. Ein Schauspieler, der einen alten Mann geschickt darstellt, ist auf der Bühne für uns auch ein alter Mann, so lange wir dem unmittelbaren Eindrucke freien Lauf lassen, und uns nicht gewaltsam besinnen, daß wir vom Theaterzettel her wissen, dieses sei der uns bekannte junge Schauspieler, welcher dort herumagiert. Wir halten ihn für zornig oder für leidend, je nachdem er uns die eine oder andere Art der Mienen und Gebärden zeigt; er erregt Schrecken oder Mitleiden in uns, wir zittern vor dem Augenblicke, den wir kommen sehen, wo er etwas Furchtbares ausführen oder erdulden wird, und die begründete Überzeugung, daß dies alles nur Schein und Spiel sei, hilft durchaus nichts gegen unsere Gemütsbewegungen, so lange der Schauspieler nicht aus seiner Rolle fällt. Im Gegenteil ergreift und foltert uns eine solche lügenhafte Geschichte, der wir scheinbar persönlich beiwohnen, vielmehr, als es eine entsprechende wahre tun würde, von der wir einen trocknen aktenmäßigen Bericht lesen.

Nun sind unsere Erfahrungen darüber, daß gewisse Mienen, Gebärden und Sprechweisen den Zustand heftigen Zorns verraten, überhaupt die Erfahrungen über die äußeren Zeichen gewisser Gemütszustände und Charaktereigentümlichkeiten, welche der Schauspieler uns vorführen kann, doch lange nicht so zahlreich und regelmäßig wiederholt, wie diejenigen Erfahrungen, welche uns gelehrt haben, daß gewisse Sinnesempfindungen gewissen äußeren Objekten entsprechen. Daher dürfen wir uns nicht wundern, wenn die Vorstellung des zu einer Sinnesempfindung gewöhnlich gehörigen Objekts nicht schwindet, auch wenn wir wissen, daß in dem vorliegenden einzelnen Falle ein solches Objekt nicht vorhanden sei.

Von der größten Wichtigkeit endlich für die Festigkeit unserer Überzeugung von der Richtigkeit unserer sinnlichen Wahrnehmung sind die Prüfungen, welche wir mittels der willkürlichen Bewegungen unseres Körpers anstellen. Es entsteht dadurch den bloß passiven Beobachtungen gegenüber dieselbe Art festerer Überzeugung, welche wir bei wissenschaftlichen Untersuchungen durch das experimentierende Verfahren gewinnen. Der eigentliche letzte Grund, durch welchen alle unsere bewußt vollzogenen Induktionen überzeugende Kraft erhalten, ist das Kausalgesetz. Wenn wir sehr häufig zwei Naturerscheinungen verbunden haben auftreten sehen, z. B. den Donner immer dem Blitze folgen, so erscheinen sie gesetzmäßig aneinander gebunden, und wir schließen, daß ein gemeinsamer Grund für beide bestehen muß, und wenn dieser Kausalnexus bisher immer bewirkt hatte, daß Donner und Blitz sich begleiteten, so werden gleiche Ursachen auch in Zukunft gleiche Wirkungen hervorbringen müssen, und der Erfolg wird auch in Zukunft derselbe sein müssen. Solange wir nun aber auf bloße Beobachtung solcher Phänomene beschränkt sind, welche ohne

unser Zutun von selbst eintreten, ohne Experimente anstellen zu können, bei denen wir den Komplex der Ursachen verändern, gewinnen wir schwer die Überzeugung, daß wir alle Bedingungen, welche auf den Erfolg Einfluß haben können, wirklich schon ermittelt haben. Es muß schon eine ungeheure Mannigfaltigkeit von Fällen existieren, auf welche das Gesetz paßt, und es muß das Gesetz den Erfolg mit großer Genauigkeit bestimmen, wenn wir uns in einem Falle bloßer Beobachtung beruhigen sollen. So ist es bei den Bewegungen des Planetensystems. Wir können freilich mit den Planeten nicht experimentieren, aber die von Newton aufgestellte Theorie der allgemeinen Gravitation gibt so vollständige und genaue Erklärung der verhältnismäßig verwickelten scheinbaren Bewegungen dieser Körper am Himmelsgewölbe, daß wir nicht mehr anstehen, sie als ausreichend bewiesen zu betrachten. Und doch sind die Versuche von Reich über die Massenanziehung von Bleikugeln, die von Foucault über die Ablenkung des schwingenden Pendels durch die Rotation der Erde, von dem letzteren und Fizeau über die Messung der Lichtgeschwindigkeit innerhalb irdischer Distanzen von dem größten Wert, um unsere Überzeugung auch auf experimentellem Wege zu kräftigen.

Es gibt vielleicht kein Ergebnis bloßer Beobachtung, welches sich so ausschließlich richtig erwiesen hat, als der vorher als Beispiel gebrauchte allgemeine Satz, daß alle Menschen, ehe sie ein gewisses Alter überschritten haben, sterben. Es ist unter vielen Millionen von Menschen kein Ausnahmsfall vorgekommen. Wäre einer vorgekommen, so würden wir annehmen dürfen, daß wir Nachricht davon hätten. Unter den Verstorbenen befinden sich Individuen, die in den verschiedensten Klimaten, von den verschiedensten Nahrungsmitteln gelebt und die verschiedensten Beschäftigungen gehabt haben. Dessenungeachtet kann man nicht sagen, daß die Behauptung, alle Menschen müßten sterben, denselben Grad von Sicherheit habe, wie irgend ein Satz aus der Physik, dessen Konsequenzen mit der Erfahrung in vielfachen Modifikationen genau experimentell verglichen sind. Für das Sterben der Menschen kenne ich den Kausalnexus nicht. Ich weiß nicht die Ursachen anzugeben, welche die Altersschwäche unabweichlich herbeiführen, wenn keine gröbere äußere Schädlichkeit dem Leben früher ein Ende gemacht hat. Ich habe mich nicht durch Experimente überzeugen können, daß, wenn ich jene Ursachen wirken lasse, Altersschwäche unausbleiblich eintritt, und daß sie nicht eintritt, wenn ich jene Ursachen ihres Eintritts beseitige. Ich kann jemandem, der gegen mich behauptet, daß unter Anwendung gewisser Mittel das Leben des Menschen unbestimmt lange erhalten bleiben würde, zwar den äußersten Grad der Ungläubigkeit entgegensetzen, aber keinen absoluten Widerspruch, wenn ich nicht weiß, daß wirklich Individuen unter den von ihm bezeichneten Umständen gelebt haben und schließlich doch gestorben sind. Wenn ich dagegen behaupte, daß alles flüssige Quecksilber, wenn es ungehindert ist, durch Wärme sich ausdehnt, so weiß ich, daß höhere Temperatur und Ausdehnung des Quecksilbers, so oft ich sie zusammen beobachtet habe, nicht bloß auf der Wirkung einer unbekannten gemeinsamen dritten Ursache beruht haben, wie ich im Falle bloßer Beobachtungen glauben könnte, sondern ich weiß durch den Versuch, daß die Wärme für sich hinreichte, auch die Ausdehnung hervorzubringen. Ich habe Quecksilber öfters erwärmt, zu verschiedenen Zeiten. Ich habe mir dabei nach eigenem Willen die Augenblicke gewählt, wo ich den Versuch beginnen wollte. Wenn also dabei das Quecksilber sich ausdehnte, so mußte die Ausdehnung bedingt sein

durch diejenigen Umstände, welche ich durch meinen Versuch herbeigeführt hatte. Ich weiß dadurch, daß die Erwärmung an sich ausreichender Grund für die Ausdehnung war, und daß keine anderen verborgenen Einflüsse weiter nötig waren, um sie hervorzubringen. Durch verhältnismäßig wenige, gut angestellte Versuche bin ich imstande, die ursächlichen Bedingungen eines Ereignisses mit größerer Sicherheit festzustellen, als durch millionenfache Beobachtung, bei welcher ich die Bedingungen nicht habe beliebig verändern können. Wenn ich z. B. die Ausdehnung des Quecksilbers nur gesehen hätte an einem mir unzugänglichen Thermometer in einem Orte, dessen Luft bei jeder Temperatur mit Feuchtigkeit gesättigt blieb, so hätte ich fragen müssen, dehnt sich das Quecksilber durch die Wärme aus, oder durch die Feuchtigkeit. Erst der Versuch, ob bei gleichbleibender Wärme Veränderung der Feuchtigkeit, ob bei gleichbleibender Feuchtigkeit Veränderung der Wärme das Volumen des Quecksilbers verändere, konnte Aufschluß geben.

Dieselbe große Bedeutung nun, welche das Experiment für die Sicherheit unserer wissenschaftlichen Überzeugungen hat, hat es auch für die unbewußten Induktionen unserer sinnlichen Wahrnehmungen. Erst indem wir unsere Sinnesorgane nach eigenem Willen in verschiedene Beziehungen zu den Objekten bringen, lernen wir sicher urteilen über die Ursachen unserer Sinnesempfindungen, und solches Experimentieren geschieht von frühester Jugend an ohne Unterbrechung das ganze Leben hindurch.

Wenn die Gegenstände nur an unseren Augen vorbeigeführt würden durch fremde Kraft, ohne daß wir selbst etwas dazu tun könnten, würden wir uns in einer solchen optischen Phantasmagorie vielleicht nie zurecht gefunden haben, ebensowenig als das Menschengeschlecht sich die scheinbaren Bewegungen der Planeten am Himmelsgewölbe zu deuten wußte, ehe man die Gesetze des perspektivischen Sehens wissenschaftlich auf sie anwenden konnte. Wenn wir aber bemerken, daß wir von einem vor uns stehenden Tische verschiedene Bilder erhalten können, wenn wir nur den Platz wechseln, daß wir nach unserem Willen in jedem uns beliebigen Augenblicke bald die erste Ansicht desselben, bald die zweite haben können, dadurch, daß wir unsere Stellung passend wechseln, daß der Tisch unseren Sinnen entschwinden kann, aber in jedem uns beliebigen Augenblicke wieder da ist, wenn wir die Augen nach ihm hinwenden, so entsteht in uns die experimentell begründete Überzeugung, daß unsere Bewegungen der Grund der wechselnden Ansichten des Tisches sind, daß dieser, ob wir ihn nun gerade sehen oder nicht sehen, doch von uns, sobald wir nur wollen, gesehen werden kann. So lernen wir durch unsere Bewegungen das ruhende Raumgebild des Tisches kennen als den Grund wechselnder Bilder in unseren Augen. Wir erklären den Tisch als daseiend, unabhängig von unserer Beobachtung, weil wir ihn in jedem uns beliebigen Augenblicke beobachten können, sobald wir uns in passende Stellung zu ihm versetzen.

Das Wesentliche bei diesem Verfahren ist eben das Prinzip des Experimentierens. Wir verändern einen Teil der Bedingungen, unter denen das Objekt wahrgenommen wird, aus eigenem Antrieb und eigener Machtvollkommenheit. Wir wissen, daß die hierdurch veranlaßten Veränderungen in der Art, wie die Objekte uns erscheinen, keinen anderen Grund haben, als die Bewegungen, welche wir gemacht haben. Wir gewinnen so eine verschiedene Reihe von Anschauungen desselben Objekts, von denen wir uns mit experimenteller Sicherheit überzeugen können, daß sie doch nur Anschauungen des einen unverändert ge-

bliebenen Objekts, ihrer gemeinsamen Ursache, sind. In der Tat sehen wir auch die Kinder in dieser Weise an den Gegenständen experimentieren. Sie drehen sie immer wiederholt nach allen Seiten, betasten sie mit den Händen und dem Munde, wiederholen dies Tag für Tag mit denselben Gegenständen, und prägen sich so ihre Form ein, d. h. die verschiedenen Gesichts- und Tasteindrücke, welche derselbe Gegenstand, von verschiedenen Seiten betrachtet und befühlt, gewährt.

Bei solchem Experimentieren an den Objekten zeigt sich ein Teil der Veränderungen in den Sinneseindrücken abhängig von dem eigenen Willen, ein anderer, nämlich alles, was von der Beschaffenheit der gerade vorliegenden Objekte abhängt, drängt sich uns auf mit einer Notwendigkeit, die wir nicht willkürlich verändern können, und die uns am fühlbarsten wird, wenn sie unangenehme Empfindungen, Schmerz, erregt. So kommen wir zur Anerkennung einer von unserem Wollen und Vorstellen unabhängigen, also äußerlichen Ursache unserer Empfindungen. Diese erweist sich dabei als fortbestehend unabhängig von unserer augenblicklichen Wahrnehmung, da wir eine jede aus der Reihe von Empfindungen, die sie in uns hervorbringen kann, in jedem von uns gewählten Augenblicke durch passende Manipulationen und Bewegungen wieder eintreten lassen können. So wird die äußere Ursache als ein unabhängig von unserer Wahrnehmung bestehendes Objekt anerkannt.

Es schiebt sich hier der Begriff der Ursache hinein, und es ist zu fragen, ob es zulässig ist, diesen bei der ursprünglichen sinnlichen Wahrnehmung vorauszusetzen. Wir sind hier wieder in der Verlegenheit, daß wir die Vorgänge nur in der Sprache der reflektierenden Wissenschaft beschreiben können, während in der ursprünglichen Form der bewußten Wahrnehmung die Reflexion des Bewußtseins auf sich selber noch nicht deutlich enthalten ist.

Das natürliche Bewußtsein, welches ganz im Interesse der Beobachtung der Außenwelt aufgeht, und wenig Veranlassung hat, seine Aufmerksamkeit dem neben dem bunten Wechsel der äußeren Objekte immer unverändert erscheinenden Ich zuzuwenden, pflegt nicht zu beachten, daß die Eigenschaften der betrachteten und betasteten Objekte Wirkungen derselben teils auf andere Naturkörper, hauptsächlich aber auf unsere Sinne sind. Indem nun so ganz abgesehen wird von unserem Nervensystem und unserem Empfindungsvermögen, als dem gleichbleibenden Reagens, auf welches die Wirkung ausgeübt wird, und die Verschiedenheit der Wirkung nur als Verschiedenheit des Objekts, von dem sie ausgeht, beachtet wird, kann die Wirkung auch nicht mehr als Wirkung anerkannt werden (denn jede Wirkung muß Wirkung auf etwas anderes sein), sondern sie wird als Eigenschaft des Körpers objektiv hingestellt, und nur als ihm angehörig betrachtet, und wenn man sich dann einmal darauf besinnt, daß wir diese Eigenschaften wahrnehmen, so erscheint uns konsequenterweise unser Eindruck als ein reines Bild der äußeren Beschaffenheit, der nur jenes Äußere wiedergibt und nur von ihm abhängig ist.

Besinnen wir uns aber über den Grund dieses Verfahrens, so ist es klar, daß wir aus der Welt unserer Empfindungen zu der Vorstellung von einer Außenwelt niemals kommen können, als durch einen Schluß von der wechselnden Empfindung auf äußere Objekte als die Ursachen dieses Wechsels; wenn wir auch, nachdem die Vorstellung der äußeren Objekte einmal gebildet ist, nicht mehr beachten, wie wir zu dieser Vorstellung gekommen sind, besonders darum, weil der Schluß so selbstverständlich erscheint, daß wir uns seiner als eines neuen Resultats gar nicht bewußt werden.

Demgemäß müssen wir das Gesetz der Kausalität, vermöge dessen wir von der Wirkung auf die Ursache schließen, auch als ein aller Erfahrung vorausgehendes Gesetz unseres Denkens anerkennen. Wir können überhaupt zu keiner Erfahrung von Naturobjekten kommen, ohne das Gesetz der Kausalität schon in uns wirkend zu haben, es kann also auch nicht erst aus den Erfahrungen, die wir an Naturobjekten gemacht haben, abgeleitet sein.

Das letztere ist vielfältig behauptet worden; das Kausalgesetz sollte ein durch Induktion gewonnenes Naturgesetz sein. Auch Stuart Mill hat es in neuerer Zeit noch wieder so aufgefaßt, und sogar die Möglichkeit besprochen, daß es vielleicht in anderen Fixsternsystemen nicht gültig sein könnte. Demgegenüber will ich hier nur zu bedenken geben, daß es mit dem empirischen Beweise des Gesetzes vom zureichenden Grunde äußerst mißlich aussieht. Denn die Zahl der Fälle, wo wir den kausalen Zusammenhang von Naturprozessen vollständig glauben nachweisen zu können, ist verhältnismäßig gering gegen die Zahl derjenigen, wo wir dazu noch durchaus nicht imstande sind. Jene ersteren gehören fast ausschließlich der unorganischen Natur an, zu den unverstandenen Fällen gehört die Mehrzahl der Erscheinungen in der organischen Natur. Ja in den Tieren und im Menschen nehmen wir nach den Aussagen unseres eigenen Bewußtseins sogar mit Bestimmtheit ein Prinzip des freien Willens an, für welches wir ganz entschieden Unabhängigkeit von der Strenge des Kausalgesetzes in Anspruch nehmen, und trotz aller theoretischen Spekulationen über die möglichen Irrtümer bei dieser Überzeugung, wird sie unser natürliches Bewußtsein, glaube ich, kaum jemals los werden. Also gerade den uns am besten und genauesten bekannten Fall des Handelns betrachten wir als eine Ausnahme von jenem Gesetze. Wäre also das Kausalgesetz ein Erfahrungsgesetz, so sähe es mit seinem induktiven Beweise sehr mißlich aus. Den Grad seiner Gültigkeit würden wir höchstens mit denjenigen der meteorologischen Regeln, dem Drehungsgesetz des Windes u. a. m. vergleichen können. Wir würden den vitalistischen Physiologen durchaus nicht mit Entschiedenheit widersprechen dürfen, wenn sie das Kausalgesetz für gut in der unorganischen Natur erklären, für die organische aber ihm nur Wirksamkeit in einer niederen Sphäre zuschreiben.

Endlich trägt das Kausalgesetz den Charakter eines rein logischen Gesetzes auch wesentlich darin an sich, daß die aus ihm gezogenen Folgerungen nicht die wirkliche Erfahrung betreffen, sondern deren Verständnis, und daß es deshalb durch keine mögliche Erfahrung je widerlegt werden kann[1]. Denn wenn wir irgendwo in der Anwendung des Kausalgesetzes scheitern, so schließen wir daraus nicht, daß es falsch sei, sondern nur, daß wir den Komplex der bei der betreffenden Erscheinung mitwirkenden Ursachen noch nicht vollständig kennen. Und wenn wir endlich mit dem Verständnis gewisser Naturprozesse nach dem Kausalgesetze fertig geworden sind, so sind die Folgerungen aus demselben: daß gewisse materielle Massen im Raume existieren und sich bewegen, und mit gewissen Bewegungskräften aufeinander wirken. Aber sowohl der Begriff der Materie, wie der der Kraft sind ganz abstrakter Art, wie sich schon aus ihren Attributen leicht ergibt. Materie ohne Kraft soll nur im Raume dasein, aber nicht wirken, also auch keine Eigenschaften haben. Sie würde also ganz gleich-

[1] Helmholtz, Über das Sehen des Menschen, ein populär wissenschaftlicher Vortrag. Leipzig 1855.

gültig sein für alle anderen Vorgänge in der Welt, sowie für unsere Wahrnehmungen, sie würde so gut wie nicht existierend sein. Kraft ohne Materie nun gar, soll wirken, aber nicht unabhängig dasein können, denn das Daseiende ist alles Materie. Beide Begriffe können also nie voneinander getrennt werden, sie sind nur abstrakte Betrachtungsweisen derselben Naturobjekte nach verschiedenen Beziehungen. Eben deshalb können aber weder Materien noch Kräfte direkter Gegenstand der Beobachtung sein, sondern immer nur die erschlossenen Ursachen der Erfahrungstatsachen. Wenn wir also schließlich als letzte und zureichende Gründe der Naturerscheinungen Abstrakta hinstellen, welche nie Gegenstand der Erfahrung sein können; wie können wir sagen, daß die Erscheinungen zureichende Gründe haben, sei durch die Erfahrung bewiesen?

Das Gesetz vom zureichenden Grunde ist vielmehr nichts anderes als die Forderung, alles begreifen zu wollen. Das Verfahren unseres Begreifens den Naturerscheinungen gegenüber ist, daß wir Gattungsbegriffe und Naturgesetze zu finden suchen. Naturgesetze sind nichts als Gattungsbegriffe für die Veränderungen in der Natur. Indem wir aber die Naturgesetze als gültig und wirksam betrachten müssen unabhängig von unserem Beobachten und Denken, während sie als Gattungsbegriffe zunächst nur die Ordnung unseres Denkens betreffen würden, nennen wir sie Ursachen und Kräfte. Wenn wir also Naturerscheinungen nicht auf ein Gesetz zurückführen können, also auch das Gesetz nicht objektiv gültig als Ursache der Erscheinungen hinstellen können, so hört eben die Möglichkeit auf, solche Erscheinungen zu begreifen.

Wir müssen aber versuchen, sie zu begreifen, wir haben keine andere Methode, sie der Herrschaft unseres Verstandes zu unterwerfen; wir müssen also an ihre Untersuchung gehen mit der Voraussetzung, daß sie zu begreifen sein werden. Somit ist das Gesetz vom zureichenden Grunde eigentlich nichts anderes als der Trieb unseres Verstandes, alle unsere Wahrnehmungen seiner eigenen Herrschaft zu unterwerfen, nicht ein Naturgesetz. Unser Verstand ist das Vermögen, allgemeine Begriffe zu bilden; er findet an unseren sinnlichen Wahrnehmungen und Erfahrungen nichts zu tun, wenn er nicht allgemeine Begriffe, Gesetze, bilden kann, die er dann objektiviert und Ursachen nennt. Wenn sich aber findet, daß die Naturerscheinungen unter einen bestimmten Kausalzusammenhang zu subsumieren sind, so ist das allerdings eine objektiv gültige Tatsache, und entspricht objektiven besonderen Beziehungen zwischen den Naturerscheinungen, die wir in unserem Denken als Kausalzusammenhang derselben ausdrücken, und eben nicht anders auszudrücken wissen.

Ebenso wie es die eigentümliche Tätigkeit unseres Auges ist, Lichtempfindung zu haben, und wir deshalb die Welt nur sehen können als Lichterscheinung, so ist es die eigentümliche Tätigkeit unseres Verstandes, allgemeine Begriffe zu bilden, d. h. Ursachen zu suchen, und er kann die Welt also begreifen nur als kausalen Zusammenhang. Neben dem Auge haben wir noch andere Organe für die Auffassung der Außenwelt, und können deshalb manches fühlen, oder riechen, was wir nicht sehen können. Neben unserem Verstande steht wenigstens für die Auffassung der Außenwelt kein anderes gleich geordnetes Vermögen da. Was wir also nicht begreifen können, das können wir uns deshalb auch nicht als existierend vorstellen.

Die ältere Geschichte der Lehre von den Sinneswahrnehmungen im allgemeinen fällt zusammen mit der Geschichte der Philosophie, wie schon am Schlusse des sieb-

zehnten Paragraphen auseinandergesetzt ist. Die Physiologen des 17. und 18. Jahrhunderts kamen mit ihrer Untersuchung meist nur bis zum Netzhautbilde, und glaubten, daß mit dessen Bildung alles abgemacht sei, daher sie denn auch durch die Fragen, warum wir die Gegenstände aufrecht sehen und warum wir sie einfach sehen trotz der Existenz zweier verkehrten Netzhautbilder, nicht wenig in Verlegenheit gesetzt wurden.

Unter den Philosophen hat zuerst Cartesius sich eingehender mit den Gesichtswahrnehmungen beschäftigt mit Berücksichtigung der naturwissenschaftlichen Kenntnisse seiner Zeit. Er erkennt die Qualitäten der Empfindung als wesentlich subjektiv an, hält aber die Anschauungen der quantitativen Verhältnisse der Größe, Gestalt, Bewegung, Lage, Dauer, Zahl der Gegenstände für objektiv richtig anschaubar. Zur Erklärung der Richtigkeit dieser Vorstellungen nimmt er aber wie die ihm nachfolgenden idealistischen Philosophen ein System angeborener Ideen an, die mit den Dingen übereinstimmten. Diese Theorie wurde dann später am konsequentesten und reinsten von Leibnitz entwickelt.

Berkeley untersuchte eingehend den Einfluß des Gedächtnisses auf die Gesichtswahrnehmungen und die induktiven Schlüsse, die dabei vorkommen, von denen er sagt, daß sie so schnell geschehen, daß wir sie nicht bemerken, wenn wir nicht absichtlich darauf achten. Diese empirische Basis führte ihn dann freilich zu der Behauptung, daß nicht bloß die Qualitäten der Empfindung, sondern auch die Wahrnehmungen überhaupt nur innere Prozesse seien, denen nichts Äußeres entspräche. Er wird zu dieser Schlußfolgerung verleitet durch den falschen Satz, die Ursache (das wahrgenommene Objekt) müsse ihrer Wirkung (der Vorstellung) gleichartig, also auch ein geistiges Wesen, nicht ein reales Objekt sein.

Die Erkenntnistheorie von Locke leugnete die angeborenen Ideen und suchte alle Erkenntnis auf Empirie zu gründen; das Streben endete aber bei Hume in der Leugnung aller Möglichkeit von objektiver Erkenntnis.

Der wesentlichste Schritt, um die Frage auf den richtigen Standpunkt zu stellen, wurde von Kant in seiner Kritik der reinen Vernunft getan, in der er allen reellen Inhalt des Wissens aus der Erfahrung ableitete, von diesem aber unterschied, was in der Form unserer Anschauungen und Vorstellungen durch die eigentümlichen Fähigkeiten unseres Geistes bedingt ist. Das reine Denken *a priori* kann nur formal richtige Sätze ergeben, die als notwendige Gesetze des Denkens und Vorstellens allerdings absolut zwingend erscheinend, aber keine reale Bedeutung für die Wirklichkeit haben, also auch niemals irgendeine Folgerung über Tatsachen einer möglichen Erfahrung zulassen können.

In dieser Auffassung ist die Wahrnehmung anerkannt als eine Wirkung, welche das wahrgenommene Objekt auf unsere Sinnlichkeit hat, welche Wirkung in ihren näheren Bestimmungen ebensogut abhängt von dem Wirkenden wie von der Natur dessen, auf welches gewirkt wird. Auf die empirischen Verhältnisse wurde dieser Standpunkt namentlich von Joh. Müller übertragen in seiner Lehre von den spezifischen Energien der Sinne.

Die nachfolgenden idealistischen Systeme der Philosophie von J. G. Fichte, Schelling, Hegel haben allen Nachdruck wieder darauf gelegt, daß die Vorstellung wesentlich abhängig sei von der Natur des Geistes, und den Einfluß, den das Wirkende auf die Wirkung hat, vernachlässigt. Sie sind deshalb auch für die Theorie der Sinneswahrnehmung von geringem Einflusse gewesen.

Kant hatte Raum und Zeit kurzweg als gegebene Formen aller Anschauung hingestellt, ohne weiter zu untersuchen, wie viel in der näheren Ausbildung der einzelnen räumlichen und zeitlichen Anschauungen aus der Erfahrung hergeleitet sein könnte. Diese Untersuchung lag auch außerhalb seines Weges. So betrachtete er namentlich die geometrischen Axiome auch als ursprünglich in der Raumanschauung

gegebene Sätze, eine Ansicht, über welche sich wohl noch streiten läßt.* Seinem Vorgange schlossen sich Joh. Müller und die Reihe von Physiologen an, welche die nativistische Theorie der Raumanschauung auszubilden suchten. Joh. Müller selbst nahm an, daß die Netzhaut in ihrer räumlichen Ausdehnung sich selbst empfinde vermöge einer angeborenen Fähigkeit dazu, und daß die Empfindungen beider Netzhäute hierbei verschmelzen. Als derjenige, welcher in neuerer Zeit am konsequentesten diese Ansicht durchzuführen und den neueren Entdeckungen anzupassen gesucht hat, ist E. Hering zu nennen.

Schon vor Müller hatte Steinbuch eine Herleitung der räumlichen Einzelanschauungen mittels der Bewegungen der Augen und des Körpers versucht. Von philosophischer Seite nahmen Herbart, Lotze, Waitz und Cornelius dieselbe Aufgabe in Angriff. Von empirischer Seite war es später namentlich Wheatstone, welcher durch die Erfindung des Stereoskops einen mächtigen Anstoß zur Untersuchung des Einflusses der Erfahrung auf unsere Gesichtsanschauungen gab. Außer kleineren Beiträgen, die ich selbst in verschiedenen Arbeiten zur Lösung dieser Aufgabe gegeben habe, sind hier als Versuche, eine empiristische Ansicht durchzuführen, zu nennen: die Schriften von Nagel, Wundt, Classen. Das Nähere über diese Untersuchungen und Streitpunkte ist in den folgenden Paragraphen zu erörtern.

1637. Cartesius, *Dioptrice, Oeuvres publiés par* V. Cousin T. V.
1644 Cartesius, Principia Philosophiae T. III.
1703. Leibnitz, *Nouveaux essais sur l'entendement humain. Opera philos. ed.* Erdmann. T. I. p. 194.
1709. Berkeley, *Theory of vision.* London.
1720. Locke, *Essai sur l'entendement humain. Trad. de l'Anglais. Londres.* L. II et IV.
Hume, Untersuchungen über den menschlichen Verstand.
1787. J. Kant, Kritik der reinen Vernunft. 2. Aufl. Riga 1787.
1811. Steinbuch, Beiträge zur Physiologie der Sinne. Nürnberg.
1816. J. F. Herbart, Lehrbuch zur Psychologie. Seine Werke herausgegeben von Hartenstein, Leipzig 1850. Bd. V.
1825. Herbart, Psychologie als Wissenschaft. Sämtliche Werke. Bd. VI.
1826. Joh. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig.
1849. Th. Waitz, Lehrbuch der Psychologie als Naturwissenschaft. Braunschweig.
1852. H. Lotze, Medizinische Psychologie. Leipzig.
1856. H. Lotze, Mikrokosmus. Leipzig.
1861. Cornelius, Die Theorie des Sehens und räumlichen Vorstellens. Halle.
M. J. Schleiden, Zur Theorie des Erkennens durch den Gesichtssinn. Leipzig.
A. Nagel, Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig u. Heidelberg.
1861—64. E. Hering, Beiträge zur Physiologie. Leipzig.
1862. W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig u. Heidelberg. Abgedruckt aus der Zeitschrift für rationelle Medizin 1858—1862.
1863. A. Classen, Das Schlußverfahren des Sehaktes. Rostock.
E. Hering über Dr. A. Classens Beitrag zur physiologischen Optik. Archiv für pathol. Anatomie und Physiologie. VIII. 2. p. 179.
1864. C. S. Cornelius, Zur Theorie des Sehens. Halle.
J. Dastich, Über die neueren physiologisch-psychologischen Forschungen im Gebiete der menschlichen Sinne. Prag.
1866. H. Ulrici, Gott und der Mensch. I. Leib und Seele, Grundzüge einer Psychologie des Menschen. Leipzig.

---

* Die empirische Geltung der geometrischen Axiome ist bekanntlich in späterer Zeit von Helmholtz mit sehr viel größerer Entschiedenheit und im Gegensatz zu Kant vertreten worden. Wir werden auf das Verhältnis der von Kant gemeinten Apriorität und des Helmholtzschen Empirismus an späterer Stelle etwas genauer eingehen. K.

§ 27. Die Augenbewegungen.

Da die Bewegungen der Augen eine wesentliche Rolle bei der Bildung der Raumanschauungen durch den Gesichtssinn spielen, so müssen wir zunächst mit ihnen näher bekannt werden.

Der Augapfel hat zwar keine aus Knochen fest geformte regelmäßige Gelenkhöhle, wie wir sie in den Gelenken der Extremitäten finden; die Augenhöhle, in der er liegt, ist vielmehr, wie Fig. 22 Bd. I S. 33 zeigt, im ganzen eine Höhlung von der Gestalt einer vierkantigen Pyramide, deren Spitze nach hinten sieht, und welche sich in keiner Weise dem nahehin kugelig geformten Augapfel anschließen kann. Die Lücken, welche zwischen dem letzteren und den knöchernen Wänden der Höhle bleiben, werden durch sehr fetthaltiges loses Bindegewebe ausgefüllt, in welchem die Muskeln, Nerven, Gefäße des Auges, die Tränendrüsen usw. liegen. Verhältnismäßig am engsten sind diese Lücken längs des vorderen Randes der Augenhöhle; es bleibt dort, namentlich nach oben, innen und außen nur ein ziemlich schmaler Spalt zwischen dem Augapfel und dem Knochen übrig, wie man leicht fühlen kann, wenn man die Fingerspitze dazwischenzuschieben sucht. Man kann dies nicht, ohne sogleich Druckbilder hervorzubringen; nur nach unten und außen gegen das Jochbein hin ist die Lücke etwas größer. Dadurch ist nun die weiche Masse von Fett, Muskeln, Nerven, Gefäßen und Drüsen, welche hinter dem Augapfel liegt, in eine Höhlung eingeschlossen, welche fast vollständig von festen Wänden umgeben ist, und nur wenige und schmale Spalten von nachgiebigerer Substanz darbietet. Diese Höhlung wird nach hinten und nach den Seiten von den knöchernen Wänden der Augenhöhle, nach vorn durch den Augapfel selbst gebildet. Da nun die genannten organischen Massen, Fett, Muskeln, Nerven usw. fast ganz inkompressibel sind, wie das Wasser, welches den größten Teil ihres Gewichts ausmacht, und weder merklich ausweichen, noch an Volum zunehmen können, so sind zunächst alle Bewegungen des Augapfels an die Bedingung gebunden, daß durch sie das Volumen der hinter dem Augapfel gelegenen Teile nicht verändert werden kann.

Der Augapfel kann also unter normalen Verhältnissen nicht in die Augenhöhle hineindringen oder aus ihr heraustreten, wenigstens nicht bei den schnell wechselnden Zusammenziehungen seiner Muskeln. Wenn Blut stärker in die Gefäße der Augenhöhle eindringt, oder aus ihnen sich entleert, wie es z. B. nach erschöpfenden Krankheiten und im Tode geschieht, so wird dadurch allerdings das Volumen der weichen hinter dem Augapfel liegenden Teile verändert, und dieser dringt vor oder zieht sich zurück. Dergleichen Veränderungen können aber bei den willkürlichen Bewegungen des Auges nicht eintreten. Wenn man versucht den Augapfel mit den aufgelegten Fingern in die Augenhöhle zurückzudrängen, so fühlt man gleich einen erheblichen Widerstand, noch ehe eine merkliche Verschiebung des Auges eingetreten ist, und man bemerkt sogleich die subjektiven Erscheinungen, welche der Druck im Auge hervorruft. Dabei sieht man die Weichteile neben dem Augapfel, namentlich unten hervordrängen; sowie man mit dem Drucke nachläßt, ziehen diese sich aber auch vermöge ihrer elastischen Spannung wieder zurück.

Ebensowenig kann sich der Augapfel als Ganzes nach rechts und links, oder nach oben und unten verschieben, weil ihm hier überall die benachbarten Teile des vorderen knöchernen Randes der Augenhöhle in den Weg treten.

Dadurch sind also alle Verschiebungen des Augapfels als Ganzes, das heißt alle Verschiebungen, bei welchen sämtliche Punkte des Augapfels sich in gleicher Richtung bewegen, unmöglich gemacht, und es bleiben als ausführbar nur Drehungen übrig, das heißt Bewegungen, bei welchen eine Seite des Augapfels in die Augenhöhle hineintritt, während eine andere heraustritt. Im ganzen hat also die Art, wie der Augapfel eingebettet ist, für die Bewegungen desselben dasselbe mechanische Resultat, als wäre er ein kugeliger Gelenkkopf, in einer kugeligen Pfanne befestigt, wie der Kopf des Oberschenkelbeins.*

Wenn der Augapfel also nur drehende Bewegungen ausführen kann, so ist die erste Frage die nach dem Mittelpunkte dieser Drehungen.

Professor Junge aus Petersburg hat in meinem Laboratorium den Drehpunkt des Auges zu bestimmen gesucht, indem er beobachtete, um wieviel sich die Lichtreflexe beider Hornhäute einander näherten, wenn die Gesichtslinien aus paralleler Stellung in einen bestimmten Konvergenzwinkel übergingen. Es zeigte sich indessen, daß die Elliptizität der Hornhäute einen merklichen Einfluß auf die Berechnung der Resultate hatte, und da es sehr mühsam ist, diese Elliptizität für viele Augen zu bestimmen, so war die Methode nicht eben ausgedehnter Anwendung fähig, obgleich sie übrigens sehr genaue Resultate gab.

Donders und Doijer[1] haben deshalb eine einfachere Methode angewendet, welche sich als zureichend genau bewährte. Es wurde zuerst der horizontale Durchmesser der Hornhaut mit dem Ophthalmometer gemessen, und die Lage der Gesichtslinie gegen die Hornhautachse bestimmt. Dann wurde ein feiner senkrechter Faden unmittelbar vor dem Auge ausgespannt, und beobachtet, wie weit das Auge nach rechts und links blicken mußte, damit bald der eine, bald der andere Rand der Hornhaut hinter den Faden trat. Aus diesem Winkel und der bekannten Breite der Drehungen ließ sich dann die Lage des Drehpunkts berechnen. Das Nähere darüber unten.

Danach ergab sich, daß bei 19 normalsichtigen Augen der Drehpunkt zwischen 10,42 und 11,77 mm hinter der durch den Rand der Hornhaut gelegten Ebene lag, im Mittel 10,957; oder 13,557 hinter dem Scheitel der Hornhaut, und etwa 10 mm vor der hinteren Fläche der Sclerotica, der letzteren also etwas näher als der Basis der Hornhaut. Die Lage des Drehpunkts hängt eben hauptsächlich ab von der Form der hinteren Hälfte des Augapfels, weil nur diese in Berührung kommt mit dem widerstehenden weichen Polster, welches den Grund der Augenhöhle ausfüllt. Diese hintere Hälfte des Augapfels scheint bei normalen Augen einem stärker abgeplatteten Ellipsoide anzugehören als die vordere; der Drehpunkt muß etwa mit dem Mittelpunkte dieses Ellipsoids zusammenfallen.

Kurzsichtige Augen sind nach hinten verlängert; bei ihnen liegt deshalb der Drehpunkt auch weiter nach hinten als bei normalsichtigen. Donders fand ihn im Maximo bis zu 13,26 mm hinter der Basis der Hornhaut oder 15,86 hinter ihrem Scheitel liegend. Hyperopische Augen dagegen sind hinten abgeflacht, wobei auch der Drehpunkt ein wenig mehr nach vorn rückt; das Minimum seiner Entfernung von der Basis der Hornhaut betrug 9,71 mm oder 12,32 hinter dem Scheitel der Hornhaut.

---

[1] Derde Jaarlijksch Verslag betr. het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. Utrecht 1862, p. 209—229.

* Über Bewegungen anderer Art s. Anm. 1 am Schlusse des Paragraphen. K.

Ob der Drehpunkt für jede Richtung und Größe der Drehung ganz konstant sei, hat Donders noch nicht untersucht.*

Es stellte sich bei diesen Versuchen ferner heraus, daß die normalen Augen mit einer einzigen Ausnahme die für diese Versuche nötigen Drehungen des Auges, welche 28° nach beiden Seiten hin betrugen, ohne Schwierigkeit ausführen konnten, die kurzsichtigen Augen aber hatten oft eine beschränktere Beweglichkeit; unter den Hyperopen fand sich ebenfalls nur ein Ausnahmsfall mit beschränkterer Beweglichkeit. Doch können die meisten Augen auch wohl noch stärkere Drehungen ausführen. Ich erreiche bei stärkerer Anstrengung in horizontaler Richtung etwa 50° nach beiden Seiten, und etwa 45° nach oben und nach unten, so daß ich von oben nach unten das Auge etwa um einen rechten Winkel, von rechts nach links um etwas mehr drehen kann. Die äußersten Drehungen sind aber schon sehr gezwängt und nicht lange zu ertragen.

Wir gehen jetzt dazu über zu untersuchen, welche Drehungen vom Augapfel ausgeführt werden. In der Art der Befestigung des Augapfels liegt kein Hindernis für eine jede Art von Drehung von mäßiger Amplitude; die Muskeln sind ebenfalls vorhanden, welche Drehung um jede beliebige Achse würden ausführen können; die genauere Untersuchung der Bewegungen der menschlichen Augen hat aber ergeben, daß unter den gewöhnlichen Umständen des normalen Sehens durchaus nicht alle Bewegungen wirklich ausgeführt werden, zu deren Ausführung die mechanischen Mittel vorhanden sind. Wir werden also zunächst die Frage zu untersuchen haben, welche Bewegungen werden vom menschlichen Auge wirklich ausgeführt?

Bei den Bestimmungen der Lage der Augen und der gesehenen Objekte handelt es sich in der Regel darum, ihre Lage im Verhältnis zu der des Kopfes zu bestimmen, dessen Lage und Richtung im Raume selbst als bekannt angenommen werden muß. Zu diesen Bestimmungen verwenden wir zunächst am passendsten folgende von Henle für die anatomischen Beschreibungen eingeführte Nomenklatur.

Der menschliche Kopf besteht aus zwei symmetrischen Hälften, seine Mittelebene der Symmetrie nennen wir die Medianebene. Diejenigen Linien, welche entsprechende Punkte der rechten und linken Kopfhälfte verbinden, nennen wir transversale oder quere Linien. Sie sind senkrecht zur Medianebene. Ebenen, welche der Medianebene parallel laufen, heißen Sagittalschnitte.

Als natürliche Stellung des Kopfes kann diejenige betrachtet werden, welche bei aufrechter Haltung des Körpers angenommen wird, wenn die Blicke nach dem Horizont gerichtet sind. Bei dieser Haltung liegt für mich die (*Glabella* des Stirnbeins der Teil dicht über der Nasenwurzel) senkrecht über den Oberzähnen. Diese Stellung ist dadurch allerdings nicht ganz genau, sondern nur annähernd bezeichnet; wie für die Augenbewegungen eine genauere Bestimmung gewonnen werden kann, wird sich später zeigen. Die in dieser Haltung durch den Kopf gelegten horizontalen Ebenen heißen Horizontalschnitte oder Querschnitte, die senkrecht zur Medianebene gelegten vertikalen Schnitte dagegen Frontalschnitte. Die Frontalschnitte und Querschnitte schneiden sich in transversalen Linien. Die Linien, in denen sich die

* Über weitere Ermittelungen des Drehpunkts s. Anm. 2 am Schlusse des Paragraphen. K.

Medianebene und die ihr parallelen Sagittalschnitte mit den Querschnitten (Horizontalschnitten) schneiden, heißen sagittale (pfeilrechte) Linien, und diejenigen, in denen sich die Medianebene und die Sagittalschnitte mit den Frontalschnitten schneiden, vertikale (senkrechte) Linien. Die transversalen Linien also verlaufen von rechts nach links, die sagittalen von vorn nach hinten, die vertikalen von oben nach unten.

So ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem gegeben, welches im Kopfe selbst als fest, und mit ihm beweglich angesehen wird. Die beiden Seiten der Medianebene sind als rechts und links zu bezeichnen, die einer Sagittalebene als innen und außen, oder wo dies eine Verwechslung in Beziehung auf das Innere von hohlen Organen zulassen würde, nach Henles Vorschlag als laterale (nach der äußeren Seite sehend) und als mediale (gegen die Medianebene sehend) zu bezeichnen. Die beiden Seiten der transversalen Schnitte werden als oben und unten bezeichnet werden können, oder wo dies bei schiefer Haltung des Kopfes zweideutig sein könnte, als stirnwärts und kinnwärts gekehrt. Die beiden Seiten der Frontalschnitte sind unzweideutig als vorn und hinten zu bezeichnnen.

Für die Bewegungen des Auges bildet der Drehpunkt den festen Punkt, und beim normalen Sehen sind beide Augen immer so gestellt, daß sie ein und denselben äußeren Punkt fixieren, welcher Punkt, da das Sehen mit bewegtem Auge Blicken genannt wird, der Blickpunkt heißen mag (sonst auch Fixationspunkt genannt). Eine gerade Linie, welche vom Blickpunkte nach dem Drehpunkte des Auges gezogen ist, nennen wir Blicklinie. Sie ist nicht ganz identisch mit der Gesichtslinie, die dem ungebrochenen Lichtstrahle entspricht, sondern muß etwas auf deren innerer (medialer) Seite liegen, da der Drehpunkt vermutlich in der Augenachse, und somit medianwärts von der Gesichtslinie liegt. Doch wird die Abweichung beider Linien voneinander in den meisten Fällen zu vernachlässigen sein. Ein Lichtstrahl, der der Blicklinie folgt, muß wie alle vom Blickpunkte ausgehenden Strahlen schließlich durch das Zentrum des gelben Flecks gehen, und wird deshalb nicht in der Verlängerung der Blicklinie bleiben können.

Eine Ebene, welche durch die beiden Blicklinien gelegt ist, werde Blickebene genannt (der Name der Visierebene, der hierfür auch gebraucht ist, wird wohl besser für die Ebene, in der die Visierlinien liegen, aufgespart; übrigens wird der Unterschied zwischen Blickebene und Visierebene in der Regel zu vernachlässigen sein). Die Verbindungslinie der Drehpunkte, welche mit den beiden Blicklinien ein Dreieck einschließt, ist als Basis dieses Dreiecks betrachtet, und dementsprechend Grundlinie (Basallinie) genannt worden. Die Medianebene des Kopfes schneidet die Grundlinie in ihrem Mittelpunkte, und die Blickebene in der Medianlinie der Blickebene.

Der Blickpunkt kann gehoben und gesenkt, das heißt stirnwärts oder kinnwärts bewegt werden. Das Feld, welches er durchlaufen kann, nennen wir das Blickfeld; seine Ausdehnung ist geringer als die des Gesichtsfeldes. Wir denken uns das Blickfeld als Teil einer Kugeloberfläche, deren Mittelpunkt im Drehpunkte liegt. Nehmen wir eine bestimmte Lage der Blickebene, die anfangs willkürlich gewählt, später näher bestimmt werden mag, als ihre Anfangslage an, so ist jede neue Lage der Blickebene zu bestimmen durch den Winkel, den sie mit der Anfangslage bildet, und den wir den Erhebungswinkel des

Blicks nennen wollen. Derselbe ist positiv zu rechnen, wenn die Blickebene stirnwärts, negativ, wenn sie kinnwärts verschoben ist.

In der Blickebene kann sich nun die Blicklinie jedes Auges lateralwärts oder medianwärts wenden; wir bezeichnen dies als Seitenwendungen des Blicks, und messen ihre Größe durch den Seitenwendungswinkel, das heißt durch den Winkel, den die Richtung der Blicklinie mit der Medianlinie der Blickebene bildet. Wendungen nach rechts mögen einen positiven Wert des Seitenwendungswinkels haben, Wendungen nach links einen negativen Wert.

Durch den Erhebungswinkel und den Seitenwendungswinkel ist die Richtung der Blicklinie gegeben. Fick, Meissner, Wundt haben dazu zwei andere Winkel benutzt. In den von mir gebrauchten Bestimmungen wird die Blicklinie erst mit der Blickebene gehoben, und dann in der Blickebene seitwärts gewendet. Fick setzt die Blickebene zuerst als horizontal voraus, und die Blicklinie in ihr horizontal verschoben um einen Winkel, den er die *Longitudo* nennt, indem er die Vertikalachse des Auges mit der Polarachse eines Erdglobus vergleicht. Dann läßt er die Blicklinie erst heben um einen Winkel, den er die *Latitudo* nennt. Bei dieser Messung sind aber sowohl die *Longitudo* als *Latitudo* in ihrem Werte abhängig von der gewählten Anfangslage der Blickebene, für welche man von vornherein keine genügend feste Bestimmungsweise hat, und jede Änderung dieser Anfangslage macht trigonometrische Berechnungen für die beiden andern Winkel nötig. Dagegen ist der von mir gewählte Seitenwendungswinkel ganz unabhängig von der Wahl der Anfangslage der Blickebene, und der Erhebungswinkel ist einfach durch Addition oder Subtraktion zu korrigieren, wenn man zu einer anderen Wahl seines Nullpunkts übergeht.

Durch die genannten Winkel ist nun die Lage der Blicklinie vollständig gegeben, aber noch nicht die Stellung des Auges. Der Augapfel würde vielmehr noch beliebige Drehungen um die Blicklinie als Achse machen können, ohne daß diese ihre Lage dabei ändert. Solche Drehungen des Augapfels um die Blicklinie als Achse pflegt man Raddrehungen zu nennen, weil die Iris sich dabei dreht, wie ein Rad. Um die Größe der Raddrehung zu messen, muß der Winkel bestimmt werden, den eine im Auge feste Ebene mit der Blickebene macht. Als solche habe ich die Ebene gewählt, welche mit der Blickebene zusammenfällt, wenn der Blick beider Augen der Medianebene parallel in aufrechter Kopfhaltung nach dem unendlich entfernten Horizonte gerichtet ist, und habe diese im Auge feste Ebene den Netzhauthorizont genannt. Ich fand diese Bestimmung unzweideutig bei meinen eigenen und bei denjenigen normalsichtigen Augen, die ich untersuchte. Sie ist es aber nicht, wie sich später herausgestellt hat, bei kurzsichtigen Augen, und muß also bei solchen entweder eine genau bestimmte Anfangslage der Blickebene festgesetzt werden, oder würde es für die später zu machenden Anwendungen vielleicht vorteilhaft sein, für solche Augen diejenige Lage der Blickebene zu benutzen, bei welcher die in der Blickebene liegenden geraden Linien sich auf korrespondierenden Stellen beider Netzhäute abbilden, was bei den normalsichtigen in der oben genannten der Medianebene parallelen Richtung des Blicks Regel zu sein scheint. Den Winkel zwischen dem Netzhauthorizonte und der Blickebene nennen wir den Raddrehungswinkel des Auges, und nehmen ihn positiv, wenn das obere Ende des vertikalen Meridians der Netzhaut nach

rechts abgewichen ist. Dabei dreht sich das Auge wie der Zeiger einer von ihm betrachteten Uhr.*

Wir wollen zunächst die Gesetze für diejenigen Bewegungen beider Augen untersuchen, bei denen beide Blicklinien fortdauernd parallel gerichtet bleiben, wie sie ausgeführt werden, wenn man eine Reihe weit entfernter Gegenstände überblickt. Bei Konvergenz der Augen treten kleine Abweichungen von dem Gesetze ein, welches für parallele Gesichtslinien gilt.

Das erste von Donders aufgestellte und durch alle späteren Untersuchungen bestätigte Gesetz ist, daß **wenn die Lage der Blicklinie in Beziehung zum Kopfe gegeben ist, dazu auch ein bestimmter und unveränderlicher Wert der Raddrehung gehört**, welcher unabhängig von der Willkür des Beobachters und unabhängig von dem Wege ist, auf welchem die Blicklinie in die betreffende Stellung gebracht ist. Ausgedrückt in der von uns gewählten Bezeichnungsweise heißt dieses Gesetz:

Der Raddrehungswinkel jedes Auges ist bei parallelen Blicklinien eine Funktion nur von dem Erhebungswinkel und dem Seitenwendungswinkel.

Donders hat namentlich entgegen der von Hueck früher aufgestellten Meinung gezeigt, daß der Wert der Raddrehung nicht wechselt bei geänderter Neigung des Kopfes, wenn dabei die Stellung der Blicklinie zum Kopfe unverändert bleibt.** Er hatte die Stellung jedes einzelnen Auges auch für unabhängig von der Stellung des anderen Auges gehalten. Indessen hat Volkmann allerdings einen, wenn auch geringen Einfluß der Konvergenz wenigstens für kurzsichtige Augen nachgewiesen, den wir nachher besprechen werden. Aber auch abgesehen davon hat Ermüdung der Augenmuskeln durch länger eingehaltene Konvergenzstellungen einigen Einfluß, und außerdem kann unter besonderen ebenfalls nachher zu besprechenden Umständen das Streben, die Objekte einfach zu sehen, unter Bedingungen, wo man dies nur mittels abnormer Augendrehungen erreichen kann, nicht sogleich, aber nach einiger Zeit einen Einfluß auf die Stellung des Auges ausüben. Kleine Veränderungen treten auch von einem zum andern Tage ein. Aber alle diese Abweichungen sind gering und beeinträchtigen der Hauptsache nach nicht die Geltung des Dondersschen Gesetzes.

Die Hauptzüge des Gesetzes der Augendrehungen, welche allen Augen gemeinsam sind, lassen sich unter folgende Gesichtspunkte zusammenfassen.

Es ist unter den verschiedenen Augenstellungen eine herauszufinden von der Art, daß wenn von ihr aus der Blick gerade nach oben oder gerade nach unten, gerade nach rechts oder nach links gewendet wird, keine Raddrehung des Auges erfolgt. Diese Stellung nennen wir die **Primärstellung** der Blicklinie. Wenn man also von der Primärstellung ausgeht, so **bringt reine Erhebung oder Senkung des Auges ohne Seitenabweichung, oder reine Seitenabweichung ohne Erhebung und ohne Senkung keine Raddrehung hervor.**

Die Lage der Blickebene, welche durch die Primärstellungen beider Blicklinien geht, nennen wir die Primärstellung der Blickebene.

---

* Über die Bezeichnungen Raddrehung und Raddrehungswinkel s. Anm. 3 am Schlusse des Paragraphen. K.

** Spätere Untersuchungen haben gezeigt, daß, entgegen dem hier Gesagten, Raddrehungen bei Kopfneigung doch stattfinden. S. darüber Anm. 4. K.

In erhobener Stellung der Blickebene geben Seitenwendungen nach rechts Drehungen des Auges nach links und Seitenwendungen nach links Drehungen nach rechts.

In gesenkter Stellung der Blickebene dagegen geben Seitenwendungen nach rechts auch Drehungen nach rechts und Seitenwendungen nach links Drehungen nach links.

Oder: Wenn der Erhebungs- und Seitenwendungswinkel dasselbe Vorzeichen haben, ist die Drehung negativ, wenn jene ungleiches Vorzeichen haben, ist die Drehung positiv.

Bei gleicher Erhebung oder Senkung ist die Rotation um so stärker, je größer die seitliche Abweichung, und bei gleicher Seitenwendung um so stärker, je größer die Erhebung oder Senkung ist.

Um sich von den angegebenen Tatsachen zu überzeugen, benutzt man nach dem von Ruete zuerst gemachten Vorschlage am besten Nachbilder. Zu dem Ende stelle man sich der Wand eines Zimmers gegenüber auf, welche mit einer Tapete überzogen ist, die horizontale und vertikale Linien erkennen läßt, ohne daß aber das Muster so scharf gezeichnet ist, daß man Schwierigkeit fände, Nachbilder auf ihm zu erkennen; am besten ist eine matte blaßgraue Grundfarbe. Dem Auge des Beobachters gerade gegenüber und in gleicher Höhe mit ihm spanne man ein horizontales schwarzes oder farbiges Band auf, zwei bis drei Fuß lang, welches stark gegen die Farbe der Tapete absticht. Um die Lage des Kopfes zu sichern, ist es vorteilhaft, den Hinterkopf fest anzulehnen, wobei man darauf zu achten hat, daß derselbe weder nach rechts noch nach links geneigt oder gedreht sei. Es muß vielmehr die Mittelebene des Kopfes vertikal gehalten werden und senkrecht zur betrachteten Wand stehen. Ob die Mittelebene des Kopfes vertikal sei, erkennt man leicht, wenn man die Augen so konvergieren läßt, daß Doppelbilder des schwarzen Bandes entstehen; diese müssen in eine gerade Linie zusammenfallen. Man fixiere nun eine kurze Zeitlang ganz fest die Mitte des Bandes, und wende dann, ohne den Kopf zu verrücken, plötzlich die Augen nach einer anderen Stelle der Wand hin. Man wird dort ein Nachbild des Bandes sehen, und durch Vergleichung dieses Bildes mit den horizontalen Linien der Tapete erkennen können, ob das Nachbild horizontal erscheint, oder nicht. Das Nachbild selbst ist entwickelt auf denjenigen Punkten der Netzhaut, die dem Netzhauthorizonte angehören, und bezeichnet bei den Bewegungen des Auges diejenigen Teile des Gesichtsfeldes, auf welche der Netzhauthorizont sich projiziert. Die Schnittlinie der Blickebene mit der gegenüberliegenden Wand dagegen muß immer horizontal sein, wenn der Kopf des Beobachters die verlangte Stellung hat, so daß die Verbindungslinie der Drehpunkte beider Augen selbst horizontal und der Ebene der Wand parallel ist. Die horizontalen Linien der Tapete geben also die Projektion der Blickebene auf die Tapete, und wie das Nachbild gegen diese Horizontallinien gedreht ist, so ist der Netzhauthorizont gegen die Blickebene gedreht.

Wir finden, daß wenn man bei richtig gewählter Stellung des Kopfes gerade nach oben und unten, oder gerade nach rechts und links sieht, das Nachbild des horizontalen Bandes mit den horizontalen Linien der Tapete zusammenfällt. Wenn man aber nach rechts und oben oder nach links und unten blickt, so ist es nach links gedreht, d. h. sein linkes Ende steht tiefer als das rechte, immer im Vergleich zu den Horizontallinien der Tapete, und wenn man

nach links oben oder rechts unten blickt, ist das Nachbild umgekehrt etwas nach rechts gedreht, sein rechtes Ende steht tiefer als das linke.

Der Sinn dieser Drehungen ist genau derselbe für das rechte wie für das linke Auge, wovon man sich am leichtesten und vollkommensten überzeugt, wenn man beide Augen gleichzeitig öffnet, während man das Nachbild hervorbringt, dann die Richtung des Blicks ändert, und während man das Nachbild betrachtet, schnell hintereinander bald das rechte, bald das linke Auge mit der Hand verdeckt. Welches man auch verdecken möge, so behält das Nachbild bei den von mir untersuchten normalsichtigen Augen vollkommen dieselbe Stellung.

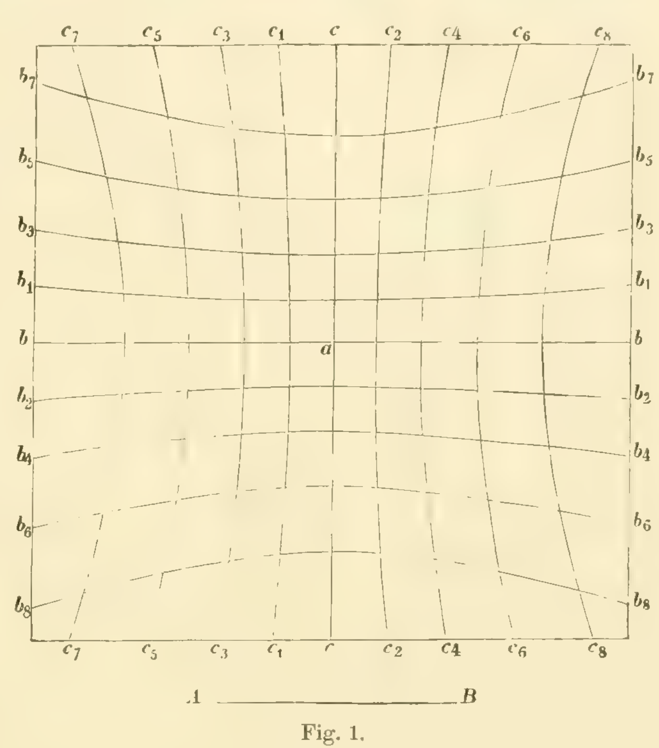


Fig. 1.

Wenn man das Band vertikal ausspannt, und in derselben Weise das Nachbild des vertikalen Bandes mit den Vertikallinien der Tapete vergleicht, so erhält man scheinbar entgegengesetzte Drehungen. Wenn man nämlich nach rechts und oben sieht, erscheint das Nachbild gegen die Vertikallinien der Tapete nicht nach links, sondern umgekehrt nach rechts gedreht. Daraus darf man aber nicht auf eine Drehung des Auges nach rechts schließen, weil in diesem Falle die vertikalen Linien der Tapete nicht mit der Projektion einer auf der Blickebene errichteten Normalen zusammenfallen, diese letztere vielmehr in demselben Sinne, wie das Nachbild, nur noch stärker gedreht erscheinen würde.

Der ganze Gang der Erscheinung nach dem für normalsichtige Augen gültigen Gesetze ist in Fig. 1 dargestellt worden. Es wird vorausgesetzt, daß das Auge sich in der Normale über a befinde in einer Entfernung gleich AB. Dann fallen die Nachbilder einer durch a gehenden horizontalen Linie, wenn sie auf einen andern Teil des Feldes projiziert werden, mit der Richtung der Kurven $b_1 b_1$, $b_2 b_2$ usw. zusammen; die einer senkrechten durch a gehenden Linie dagegen mit der Richtung der Kurven cc, $c_1 c_1$, $c_2 c_2$ usw. Die Kurven sind für normale Augenbewegungen Hyperbeln.

Da nun, wenn man von der Primärstellung ausgeht und den Blick schief nach oben oder unten wendet, die Nachbilder vertikaler Linien, verglichen mit den Vertikallinien der Wand, scheinbar die entgegengesetzte Drehung erleiden als die horizontalen Nachbilder im Vergleich mit horizontalen Linien der Wand,

so darf man sogleich vermuten, daß zwischen horizontalen und vertikalen Linien mitten inne für jede Augenbewegung eine Richtung des Nachbilds existieren wird, wobei es der Richtung seines Objekts parallel bleibt; und in der Tat ist das auch der Fall. Man findet nämlich, daß die Nachbilder schräger Linien, die man in der Primärlage fixiert hat, ihrem Objekt parallel bleiben, wenn man den Blick entweder in der Verlängerung der Objektlinie, oder von der Primärlage ausgehend senkrecht zu dieser wandern läßt.

Es sei also in Fig. 2 *o* der Punkt, wo die Blicklinie in der Primärstellung die Ebene der Zeichnung senkrecht schneidet; *aa* sei eine vertikale, *bb* eine horizontale durch *o* gezogene Linie. Wird der Blick nach *p* gewendet, so erhalten ihre Nachbilder die Lagen $\alpha\alpha$ und $\beta\beta$, welche beide den Linien *aa*, beziehlich *bb* nicht parallel sind. Zieht man aber durch *o* die Linien *cc* und *dd*, von denen die erstere die Richtung der Verbindungslinie *op* hat, die zweite senkrecht darauf ist, so geben diese in *p* Nachbilder $\gamma\gamma$ und $\delta\delta$, welche ihren Objektlinien parallel sind.

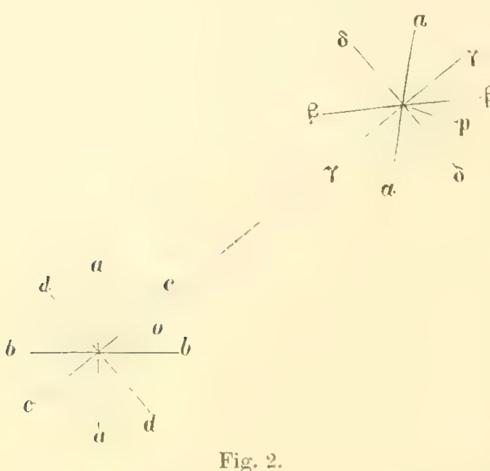


Fig. 2.

Bei den von mir untersuchten Augen schien dieses Gesetz mit desto größerer Schärfe erfüllt zu sein, je weniger kurzsichtig sie waren.

In dem in Fig. 2 angedeuteten Versuche ergibt also die Beobachtung, daß sich die Linien $\delta\delta$ und $\gamma\gamma$, wenn der Blick nach *p* gewendet ist, auf denselben Netzhautteilen abbilden, auf denen sich *dd* und *cc* abbilden, wenn der Blick nach *o* gewendet ist. Fragt man nun, um was für eine Rotationsachse der Augapfel gedreht werden müsse, um aus der ersten Lage in die zweite überzugehen, so ergibt sich leicht, daß die Achse parallel den Linien *dd* und $\delta\delta$ sein müsse, und daher senkrecht zu der durch *op* und den Drehpunkt gelegten Ebene. Denkt man sich diese letztere Ebene in fester Lage zum Augapfel, so wird ihre Lage nicht geändert, wenn sie mit dem Augapfel um eine zu ihr normal gerichtete Achse gedreht wird. Ihre Schnittlinie mit der Ebene der Zeichnung *op* bleibt deshalb bei solcher Bewegung ebenfalls ungeändert, und diese Schnittlinie, zu deren Teilen auch *cc* und $\gamma\gamma$ gehören, bildet sich dabei immer auf den gleichen Netzhautteilen ab, wie es die Ergebnisse des Versuchs erfordern. Denkt man aber durch die Achse und die ihr parallele Linie *dd* eine Ebene gelegt, und diese um die Achse gedreht, so wird auch nach der Drehung die Schnittlinie $\delta\delta$ dieser Ebene und der Ebene der Zeichnung parallel der Achse und also auch parallel der Linie *dd* bleiben müssen. Denn wenn eine Ebene durch eine gerade Linie (Rotationsachse) geht, welche einer andern Ebene (der Ebene der Zeichnung) parallel ist, so ist auch die Schnittlinie beider Ebenen der genannten Linie (Rotationsachse) parallel.

Wir können also das Bewegungsgesetz parallel gerichteter normalsichtiger Augen folgendermaßen aussprechen: W e n n d i e B l i c k l i n i e a u s i h r e r P r i m ä r s t e l l u n g ü b e r g e f ü h r t w i r d i n i r g e n d e i n e a n d e r e S t e l l u n g, s o i s t d i e R a d d r e h u n g d e s A u g a p f e l s i n d i e s e r z w e i t e n S t e l l u n g e i n e

solche, als wäre er um eine feste Achse gedreht worden, die zur ersten und zweiten Richtung der Blicklinie senkrecht steht.

Dieses Gesetz der Augenbewegungen ist in dieser Weise zuerst von Listing aufgestellt worden und wird deshalb nach ihm benannt.

Es ist dabei nicht nötig, daß die Bewegung des Blicks aus der ersten in die zweite Richtung wirklich längs einer geraden Linie vor sich geht, oder daß der Augapfel wirklich um eine konstant bleibende Rotationsachse gedreht wird, sondern die Überführung aus der ersten in die zweite Stellung kann auf beliebigem Wege geschehen; nach dem Gesetze von Donders wird die endliche Stellung doch immer die gleiche sein, und die Richtigkeit von diesem Donders-schen Gesetze läßt sich wiederum in der Art erweisen, daß man die Überführung des Blicks absichtlich auf verschiedenen Wegen vornimmt und sich durch die Kongruenz des Nachbildes $\gamma\gamma$ mit der Linie *op* von der Identität der schließlich eingetretenen Raddrehung des Auges überzeugt.

Doch ist dabei allerdings zu bemerken, daß im ersten Augenblicke, wo die Blicklinie nach ausgiebigen Bewegungen an dem neu gewählten Fixationspunkte angekommen ist, zuweilen noch eine etwas abweichende Stellung des Nachbildes zu bemerken ist, die aber schon nach einer oder zwei Sekunden in die normale übergeht.

Wenn man nach dem durch solche Versuche bestätigten Gesetze von Listing die Größe des Rotationswinkels γ berechnet, ausgedrückt durch den Erhebungswinkel α, und die Seitenwendung β, so findet man folgende Gleichung:

$$-\operatorname{tang}\gamma = \frac{\sin\alpha\sin\beta}{\cos\alpha + \cos\beta}$$

oder für logarithmische Rechnung geeigneter

$$-\operatorname{tang}\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \operatorname{tang}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\operatorname{tang}\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

In der folgenden Tabelle sind die Werte des Drehungswinkels von 5 zu 5 Graden der beiden andern Winkel berechnet.

Erhebungswinkel

Seitenwendung	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
5°	0° 13′	0° 26′	0° 40′	0° 53′	1° 7′	1° 20′	1° 35′	1° 49′
10°	0° 26′	0° 53′	1° 19′	1° 46′	2° 13′	2° 41′	3° 10′	3° 39′
15°	0° 40′	1° 19′	1° 59′	2° 40′	3° 21′	4° 2′	4° 45′	5° 29′
20°	0° 53′	1° 46′	2° 40′	3° 34′	4° 29′	5° 25′	6° 22′	7° 21′
25°	1° 7′	2° 13′	3° 21′	4° 29′	5° 38′	6° 48′	8° 0′	9° 14′
30°	1° 21′	2° 41′	4° 2′	5° 25′	6° 48′	8° 13′	9° 39′	11° 8′
35°	1° 35′	3° 10′	4° 45′	6° 22′	8° 0′	9° 39′	11° 21′	13° 6′
40°	1° 49′	3° 39′	5° 29′	7° 21′	9° 14′	11° 8′	13° 6′	15° 5′

Für diejenigen Bewegungen des Blicks also, welche von der Primärlage anfangen, und in irgend eine andere Lage überführen, ist nach dem Listing-schen Gesetze die Drehungsachse immer gelegen in einer Ebene, die zur Blicklinie senkrecht ist. Es gehe diese Ebene der Drehungsachsen durch *AA*, Fig. 3, normal zu *OB*, der Blicklinie. Eine zweite Ebene, 𝔄, welche in

der Primärstellung des Auges mit der Ebene AA zusammenfällt, denke man sich durch den Augapfel gelegt und mit diesem fest verbunden. Wenn nun die Blicklinie OB in eine Sekundärstellung OF gebracht ist, hat 𝔄 eine andere Lage als AA, nämlich CC. Um von dieser ersten Sekundärstellung in irgendwelche andere Stellungen überzugehen, kann man das Auge nun wieder um feste Achsen drehen, die auch alle in einer und derselben Ebene liegen, und zwar in derjenigen Ebene, welche den Winkel der Ebenen AA und CC halbiert, die also die Ebene der Zeichnung rechtwinklig in der Linie HH schneidet. Es ist dies die Ebene der Drehungsachsen für die betreffende Sekundärstellung der Blicklinie OF.

Endlich um von irgend einer Stellung a des Augapfels in eine andere Stellung b überzugehen, konstruiere man die Ebenen der Drehungsachsen für die beiden Stellungen a und b. Die Schnittlinie beider Ebenen ist die Achse, um welche man das Auge zu drehen hat, um es von a nach b überzuführen. Denn es ist evident, daß diese Achse beiden Ebenen angehören muß, da man dieselbe Bewegung auch von b nach a machen kann, und die betreffende Drehungsachse sowohl den Bedingungen der von a als der von b ausgehenden Bewegungen genügen muß, d. h. in den beiden Blickpunkten zugehörigen Ebenen der Drehungsachsen liegen muß.

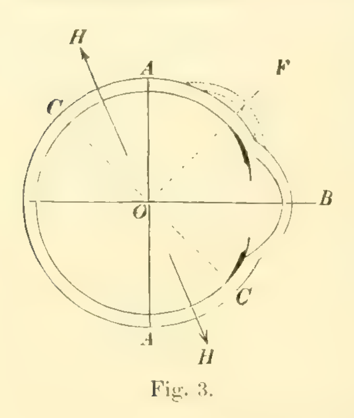


Fig. 3.

Bei den bisher geprüften normalsichtigen oder schwach kurzsichtigen Augen bewährte sich die Richtigkeit des Listingschen Gesetzes mit großer Genauigkeit für alle parallelen Stellungen beider Blicklinien. Die Methode der Nachbilder erlaubt bei guter Ausführung die Stellung des Augapfels bis auf etwa einen halben Winkelgrad genau zu bestimmen. Eine andere Methode, welche auf der Vergleichung der Bilder beider Augen beruht, und die zuerst von Meissner angewendet und später von Volkmann weiter ausgebildet ist, erlaubt noch genauere Bestimmungen bis auf etwa $^1/_{10}$ Grad herab zwar nicht für die Stellung jedes einzelnen Augapfels, aber doch für die Differenzen der Stellung beider Augen. Versuche nach dieser Methode, deren Ausführung unten näher beschrieben wird, zeigen für meine eigenen Augen in den äußersten peripherischen Stellungen nach oben und unten Abweichungen vom Listingschen Gesetz, die für jedes einzelne Auge nur neun Winkelminuten betragen. Volkmann fand für seine etwas kurzsichtigeren Augen Maximalabweichungen beim Blick schräg nach unten rechts und links bis zu 54 Minuten für beide Augen zusammen, was auf jedes einzelne etwa 27 Minuten ausmacht. Stärker kurzsichtige Augen, wie die von Herrn Dr. Berthold, zeigten aber stärkere Abweichungen namentlich in den peripherischen Stellungen nach oben und unten, die wahrscheinlich mit mechanischen Hindernissen in der Bewegung des nach hinten verlängerten kurzsichtigen Augapfels zusammenhängen werden.*

Die bisherigen Angaben beziehen sich auf parallele Stellungen beider Blicklinien. Merkliche Abweichungen davon, bei verschiedenen Individuen von verschiedener Größe, treten nun nach einer Entdeckung von Volkmann ein, wenn

* Vgl. hierüber Anm. 5 am Schluß des Paragraphen. K.

die Blicklinien konvergent gestellt werden zur Betrachtung eines nahen Gegenstandes. Bei VOLKMANNS eigenen Augen bringt Konvergenz auf die Punkte einer in 30 Zentimetern vor den Augen liegenden Ebene eine gleichmäßige Vermehrung der Divergenz der scheinbar vertikalen Meridiane beider Augen von zwei Graden hervor, wenn man sie vergleicht mit der Divergenz, welche die genannten Meridiane nach dem LISTINGschen Gesetze hätten haben sollen, unter Voraussetzung derselben Divergenz und derselben Primärlage, welche bei parallelen Augenstellungen gefunden waren. Soweit also der Einfluß der Konvergenz sichtbar wird in der veränderten Differenz der Stellung beider Augen, könnte man für VOLKMANNS Augen sich vorstellen, daß dieselben in Konvergenz eine tiefere Primärstellung haben, oder daß die Drehung des Auges in der Primärstellung, welche wir als Nullpunkt der Raddrehungen betrachten, verändert ist. Diese Veränderung nimmt zu mit steigender Konvergenz.

Für meine eigenen Augen ist diese Drehung durch Konvergenz in den mittleren Teilen des Gesichtsfeldes viel geringer als bei VOLKMANN, nämlich nur $^1/_9$ der Größe, die sie bei jenem hat, so daß sie mir bei den Nachbildversuchen verborgen blieb; geschieht übrigens in demselben Sinne. Dagegen fand ich bei Nachbildversuchen, daß in den peripherischen seitlichen Richtungen des Blicks durch Konvergenz Abweichungen des Nachbildes von 2^0 bis $2\,^1/_2{}^0$ eintreten in dem Sinne, als wäre die Primärstellung meiner Augen für die Konvergenzstellungen ein wenig tiefer zu nehmen, als für die Parallelstellungen. In Fig. 4 bezeichnen die kurzen dicken Striche die Lage der Nachbilder für konvergente Augenstellungen, aber mit übertriebener Größe der Abweichung. Die Objekte jener Nachbilder hatten im Zentrum gelegen und waren den ausgezogenen Radien des Gesichtsfelds parallel gewesen, so daß ihre Nachbilder bei parallelen Gesichtslinien auch in den genannten Radien liegen geblieben wären. Bei *cd* sind die Abweichungen am deutlichsten, bei *fg* klein und unsicher.

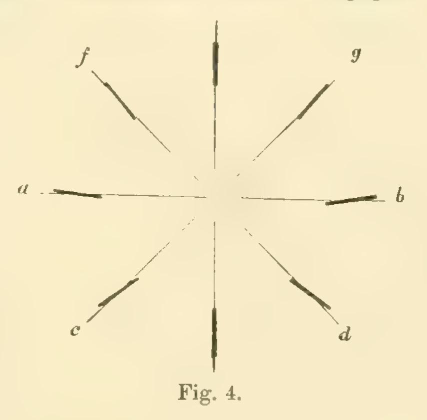


Fig. 4.

Herr DASTICH, dem die übrigen entsprechenden Beobachtungen sehr gut gelangen, konnte gar keinen Einfluß der Konvergenz bei seinen Augen finden. Über die Größe dieses Einflusses bei verschiedenen Individuen sind also noch weitere Untersuchungen nötig.*

Überhaupt muß ich bemerken, daß für meine Augen sich eine gewisse Veränderlichkeit der Drehungen herausstellt. Die Primärstellung liegt an einem Tage ein wenig höher, am andern tiefer, und verändert sich sogar, während ich eine Reihe von Versuchen ausführe. Namentlich für die peripherischen Richtungen des Blicks, die mit einiger Anstrengung verbunden sind, finde ich zuweilen merklich verschiedene Stellungen in unmittelbar aufeinanderfolgenden Versuchen und trotz möglichster Gleichartigkeit ihrer Ausführung. Man muß also von dem Auge nicht ganz dieselbe Präzision der Bewegung erwarten, wie von einem physikalischen Apparate, wenn auch normale Augen unter gewöhnlichen Bedingungen ziemlich genau dem DONDERSschen und LISTINGschen Gesetze folgen.

* Vgl. hierzu Anm. 6 am Schluß des Paragraphen. K.

Endlich ist noch der Anteil zu bestimmen, den die einzelnen Augenmuskeln an den einzelnen normalen Bewegungen des Auges zu nehmen haben. Wie oben Bd. I S. 33) schon bemerkt ist, drehen der innere und äußere gerade Augenmuskel, für sich wirkend, das Auge um eine vertikale Achse; die Achse für die Drehung durch den unteren und oberen geraden Muskel liegt nach den Bestimmungen von RUETE horizontal, mit dem inneren Ende nach vorn sehend, unter einem Winkel von etwa 70° und der Blicklinie; die Achse für den oberen und unteren schiefen Muskel liegt ebenfalls horizontal, das äußere Ende nach vorn sehend, unter einem Winkel von etwa 35° mit der Blicklinie. Drehungen um die vertikale Achse des inneren und äußeren geraden Muskels entsprechen dem Gesetze von LISTING, diese Muskeln können also auch isoliert angewendet werden. Dagegen würden Drehungen um die beiden anderen Achsen dem LISTINGschen Gesetze nicht entsprechen. Um für eine Bewegung nach oben eine horizontal von rechts nach links gerichtete Drehungsachse zu erhalten, muß man eine Drehung durch den *Rectus superior* mit einer durch den *Obliquus inferior* verbinden; für eine Drehung nach unten den *Rectus inferior* mit dem *Obliquus superior*. Es ist ein bekanntes mechanisches Gesetz, daß man für kleine Drehungen die Drehungsachsen nach dem Gesetz des Parallelogramms der Kräfte zusammensetzen kann, wobei die Größe der Drehung die Intensität der Kraft repräsentiert, und alle Drehungen, die vom Mittelpunkte aus gesehen nach rechts herum (wie der Zeiger einer Uhr) vor sich gehen, als positiv, die entgegengesetzten als negativ gerechnet werden. In Fig. 5 ist ein horizontaler Querschnitt des Auges gezeichnet mit den Drehungsachsen, wobei die positiv zu rechnenden Enden der Achsen mit den Anfangsbuchstaben der betreffenden Muskeln, *Obliquus superior* und *inferior*, *Rectus superior* und *inferior* bezeichnet sind. Außerdem ist die nach dem LISTINGschen Gesetz geforderte Horizontalachse OU für die Bewegungen nach oben und unten angegeben; der Buchstabe O bezeichnet das positive Ende der Achse für die Drehung nach oben, U für die nach unten. Die Zeichnung entspricht dem linken Auge von oben gesehen, oder dem rechten von unten.

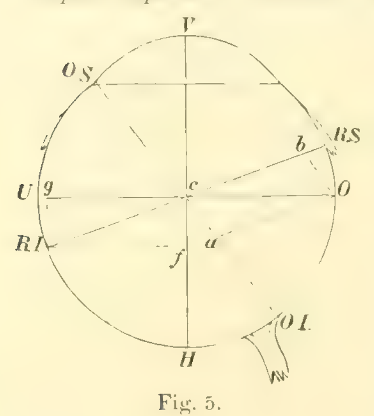


Fig. 5.

Wenn nun das Linienstück cb der Größe der Drehung durch den *Rectus superior* proportional ist, ca der durch den *Obliquus inferior*, so bezeichnet cO als Diagonale des Parallelogramms $cbOa$ die Richtung der gemeinsamen Drehungsachse und ist der Größe dieser Drehung proportional. Es erhellt aus dieser Figur, daß bei derjenigen Lage, welche die Achsen bei geradeaus gerichtetem Auge haben, die resultierende Drehungsachse UO der Achse der betreffenden beiden geraden Augenmuskeln näher liegt, als derjenigen der schiefen Muskeln. Dadurch wird denn die Seite bc des Parallelogramms größer als ca, d. h. der betreffende gerade Muskel muß eine stärkere Anstrengung machen als der mitwirkende schiefe Muskel. Wenn sich der Augapfel aber nach innen dreht, nähert sich die der veränderten Sehstellung zugehörige Drehungsachse $\overline{UO}$ mehr der Achse der schiefen Muskeln, so daß bei Konvergenz der Augen die letzteren verhältnismäßig mehr in Anspruch genommen werden müssen als bei Parallelismus der Blicklinien.

Es ist hierbei zu bemerken, daß die Augenmuskeln alle einen ziemlich breiten Ansatz am Augapfel haben, wobei ihre Fasern sich sogar etwas fächerförmig ausbreiten. Dies hat zur Folge, daß selbst, wenn der Augapfel sich ziemlich bedeutend aus seiner Primärstellung gedreht hat, doch die Drehungsachsen für die einzelnen Muskeln ihre Lage im Raume nicht erheblich verändern. Nehmen wir als Beispiel den *Rectus superior* und *inferior*, welche sich oberhalb der Hornhaut, etwa 7 mm von deren Rande entfernt iserieren (Fig. 2 Bd. I S. 3, bei *m* und *n*), so spannen sich, wenn das Auge nach innen gedreht ist, bei der Verkürzung des Muskels vorwiegend die Fasern der Sehne, welche nach dem äußeren Rande der Hornhaut hin gerichtet sind, weil diese am meisten verlängert sind. Man kann sich davon an Präparaten des Augapfels mit seinen Muskeln leicht überzeugen. Wenn sich das Auge nach außen dreht, wirken dagegen hauptsächlich die inneren Stränge beider Sehnen. So bleibt die Richtung des Muskelzuges dieselbe trotz der veränderten Stellung des Auges.

Diese aus der Anordnung der Muskeln gezogenen Schlüsse werden bestätigt durch die Erfahrungen, welche bei krankhafter Lähmung einzelner Muskeln beobachtet worden sind. Wenn z. B. der obere schiefe Muskel gelähmt ist, so kann der innere gerade Muskel, allein wirkend, das Auge noch nach unten wenden. Aber Drehung um die Achse RI gibt nicht bloß eine resultierende Drehung nach der Achse CU, entsprechend der Länge eg in Fig. 5, wie sie verlangt wird, sondern auch eine kleinere, entsprechend der Länge ef, nach der Achse CH, welche also einer negativen Drehung, einer Drehung nach links herum um die Blicklinie entspricht. Dabei erleiden dann die Objekte im Gesichtsfelde eine Scheindrehung nach rechts herum, wie der Zeiger einer Uhr.

Für die Bewegungen aus der Primärstellung in schräger Richtung aufoder abwärts muß eine Komponente nach der Achse UO mit einer vertikalen Komponente verbunden werden. Um nach innen und oben zu drehen, brauchen wir also den *R. internus*, der nach innen dreht um die vertikale Achse, zugleich mit dem *R. superior* und *Obl. inferior*, die vereinigt nach oben drehen um die Achse UO.

Mittels des Schemas in der Fig. 5 lassen sich diese Kombinationen leicht übersehen, sonst sind für die bequemere Übersicht derselben drehbare Modelle des Auges konstruiert, Ophthalmotrope, deren Beschreibung unten folgen wird.

Abgesehen von den bisher besprochenen Beschränkungen der Bewegung jedes einzelnen Auges, sind nun auch die Bewegungen unserer beiden Augen in gewisser Weise sowohl voneinander abhängig, als auch die Akkommodation von der Augenstellung abhängig ist. Unter den gewöhnlichen Verhältnissen des normalen Sehens richten wir immer beide Blicklinien auf einen im Raume vor uns liegenden reellen Punkt, welcher nah oder weit entfernt sein kann. In diesem Punkte, dem Blickpunkte, schneiden sich beide Blicklinien. Trotzdem jedes Auge einen ganz selbständigen Muskelmechanismus hat, und also die Möglichkeit besitzt, jede Art der Bewegung ganz unabhängig von dem andern Auge auszuführen, so haben wir doch nur gelernt diejenigen Bewegungen wirklich auszuführen, welche nötig sind, um einen reellen Punkt deutlich und einfach mit beiden Augen zu sehen. So können also beide Augen gleichzeitig gehoben werden, um einen hoch gelegenen Blickpunkt zu fixieren; sie können auch beide gleichzeitig gesenkt werden, um ein tief gelegenes Objekt anzublicken. Wir sind aber ohne weitere Hilfsmittel nicht imstande, willkürlich das eine

nach oben, das andere nach unten zu richten, wobei sich die Blicklinien in keinem reellen Blickpunkte schneiden würden.

Wir können ferner beide Blicklinien nach rechts oder beide nach links wenden, um beziehlich einen rechts oder links gelegenen Gegenstand zu betrachten. Wir können sie auch konvergent machen, indem wir die rechte nach links, die linke nach rechts wenden, wenn wir einen nahen Fixationspunkt wählen. Aber jemand, der sich nicht schon besonders darauf eingeübt hat, kann die Blicklinien nicht divergent machen, indem er die rechte nach rechts, die linke nach links wendet.

Endlich folgt auch bei normalen Augen die Akkommodation immer der Entfernung desjenigen Gegenstandes, auf welchen die Blicklinien konvergieren. Bei parallelen Blicklinien sind die Augen für unendliche Ferne eingerichtet, bei konvergierenden für die Nähe, und sind desto stärker akkommodiert, je stärker die Konvergenz ist. Kurzsichtige Augen sind dagegen für ihren Fernpunkt akkommodiert, solange die Blicklinien auf ihn oder auf einen noch entfernteren Punkt konvergieren. Für nähere Blickpunkte folgt die Akkommodation der Konvergenz. Sehr kurzsichtige Augen können aber ohne Brille oft gar nicht mehr binokular fixieren oder akkommodieren.

Obgleich nun der Zwang, beide Augen übereinstimmend zu bewegen, und auch die Akkommodation damit in Übereinstimmung zu bringen, beim normalen Sehen so unausweichlich erscheint, daß ältere Physiologen diese Bewegungen in die Klasse der unwillkürlich eintretenden Mitbewegungen rechneten, so läßt sich doch zeigen, daß die Gesetzmäßigkeit dieser Verbindungen nur auf Einübung beruht. Man muß dabei im allgemeinen beachten, daß die Intention unseres Willens bei allen willkürlichen Bewegungen sich immer nur auf die Erreichung eines direkt und deutlich wahrnehmbaren äußeren Erfolges bezieht. Bei den Bewegungen unserer Extremitäten können wir allerdings durch den Gesichtssinn die Stellung wahrnehmen, in welche das Glied durch eine gewisse Willensaktion versetzt wird, und deshalb ist für sie und für alle durch das Gesicht und Getast wahrnehmbaren Teile des Körpers die Stellung des zu bewegenden Teils der nächste bewußte Zweck der darauf gerichteten Willensaktionen. Bei allen nicht sichtbaren und nicht fühlbaren Teilen des Körpers ist es aber nicht die Stellung und Bewegung, sondern erst der durch diese zu erreichende Erfolg, den wir durch eine willkürliche Aktion zu erreichen wissen. So gebrauchen wir unseren Kehlkopf und die Teile unseres Mundes mit einer bewundernswürdigen Sicherheit und Geschicklichkeit, um die zartesten Veränderungen der Tonhöhe und Klangfarbe unserer Gesangs- und Sprachlaute hervorzubringen, und doch weiß der Laie gar nicht, und der Physiologe unvollkommen genug, was für Bewegungen wir eigentlich dabei ausführen. Hier bezieht sich also die Willensintention nur auf den hervorzubringenden Ton, nicht auf die Bewegung der einzelnen Teile des Kehlkopfs, und wir haben gelernt alle diejenigen Bewegungen des Kehlkopfs auszuführen, die für einen solchen Zweck nötig sind, aber keine anderen.

Ähnlich ist es mit den Augen; wir können ihre Bewegungen nicht selbst sehen, außer wenn wir vor einem Spiegel stehen; wir können sie auch nur sehr unvollkommen fühlen. Aber wir nehmen sehr deutlich wahr die Verschiebung der optischen Bilder auf der Netzhaut, oder vielmehr das entsprechende Wandern des Blickpunktes im Gesichtsfelde, wenn wir Bewegungen mit den Augen machen. Dies ist also auch die Wirkung, auf die unsere Willensintention

gerichtet ist, und welche wir willkürlich zu erreichen wissen. Wenn wir wünschen, daß jemand, der noch nicht über seine Augenbewegungen zu reflektieren gelernt hat, die Augen nach rechts wenden soll, so müssen wir ihm nicht sagen: „Wende dein Auge nach rechts", sondern „Sieh jenen rechts gelegenen Gegenstand an". Und selbst der Geübte beherrscht seine Augenbewegungen sicherer, wenn er entsprechende Gegenstände zur Fixation wählt, als wenn er eine bestimmte Stellung der Augen ohne solche Fixation einhalten will. Ich kenne einen ausgezeichneten und in der Optik höchst erfahrenen und geübten Physiker, dem es unmöglich ist, seine Gesichtslinien parallel zu stellen, wenn er nicht sehr ferne Objekte vor sich hat, oder Doppelbilder auseinander zu treiben, wenn er nicht ein passendes Fixationsobjekt dazu hat, und auch dann sie schwer auseinanderhält, sobald er auf sie zu achten anfängt. Ich führe dies Beispiel an, weil es zeigt, welches der Zustand des natürlichen Auges ist, mit dem noch keine physiologischen Experimente angestellt sind, und welches noch nicht gelernt hat, über seine Stellungen zu reflektieren, trotzdem daneben vollständige Einsicht in die Theorie des Sehens vorhanden ist.

Unsere Willensintention beim Gebrauche der Augen ist also darauf gerichtet, nacheinander einzelne Punkte des Gesichtsfeldes möglichst deutlich mit beiden Augen zu sehen; dies wird erreicht, wenn wir das betreffende Objekt in beiden Augen auf dem Zentrum der Netzhautgrube abbilden, und wir haben dementsprechend gelernt, unsere beiden Augen so zu stellen und so zu akkommodieren, daß dies geschieht. Andere Bewegungen mit den Augen auszuführen, welchen kein solcher Zweck des möglichst deutlichen Sehens zugrunde liegt, auf den unser Willen sich richten könnte, haben wir nicht gelernt.

Es scheint mir damit zusammenzuhängen, daß wir leichter parallele, ja selbst divergente Stellungen der Blicklinien hervorbringen beim Sehen nach oben, wo sich der Horizont und der Himmel darzubieten pflegt, konvergente leichter beim Sehen nach unten, wo der Fußboden und die Objekte, welche man in den Händen hält, zu betrachten sind.

Indem man aber nun die Art der Willensanstrengung kennen lernt, welche für Erreichung der verschiedenen Augenstellungen als solcher dient, kann jemand, der viel physiologisch-optische Versuche anstellt, allmählich auch lernen, zunächst solche normale Augenstellungen hervorzubringen, für welche zurzeit kein Fixationsobjekt vorhanden ist, indem man gleichsam nach einem imaginären Fixationsobjekte blickt. Wenn man sich also z. B. nahe vor dem Nasenrücken ein solches Objekt vorstellt, oder gleichsam nachsucht, ob keines dort vorhanden sei, kann man so starke Konvergenz hervorbringen, daß die Augen wie die eines Schielenden aussehen. Und umgekehrt kann man nahe Gegenstände mit parallelen Gesichtslinien betrachten, wenn man durch sie hin in die Ferne zu sehen sucht, oder wenn man, wie das Volk sagt, nach ihnen hingewendet „in das Blaue stiert", das heißt die Art von Blick annimmt, welche einzutreten pflegt, wenn man in Gedanken versunken gar nicht auf die Gegenstände achtet, die man vor sich hat, wobei denn die Akkommodationsanstrengung nachläßt, ebenso die entsprechende Konvergenzstellung, und die Augen ihre Fernstellung annehmen.

Geht man von Konvergenzstellungen zur parallelen Stellung der Blicklinien über, ohne ein bestimmtes einzelnes Objekt zu fixieren, und übertreibt man die zu diesem Übergange nötige Anstrengung, so bringt man auch schwache Divergenzstellungen heraus.

Die Fähigkeit, jeder Zeit und ohne entsprechendes Objekt Konvergenzstellungen und Parallelstellungen der Blicklinien hervorbringen zu können, ist für jeden, der sich mit physiologisch-optischen Untersuchungen beschäftigen will, von großer Wichtigkeit, und muß geübt werden.

Dann aber kann man nun auch, freilich zunächst nur in geringerem Grade, diejenigen Kombinationen von Augenstellungen hervorbringen, welche beim gewöhnlichen Sehen nicht vorkommen. Um es zu tun, braucht man nur die Augen unter solche Bedingungen zu versetzen, daß nur durch Abweichung von den normalen Stellungen einfache und deutliche Bilder herzustellen sind.

Was zunächst die Verbindung zwischen Konvergenz und Akkommodation betrifft, so wird diese sogleich verändert, wenn man eine Brille aufsetzt. Normalsichtige Augen z. B., welche eine Brille mit schwachen Konkavgläsern vorsetzen, sind gezwungen, um entfernte Gegenstände deutlich zu sehen, bei parallel gerichteten Blicklinien doch für die Nähe zu akkommodieren. Ist die Brille nicht zu stark, so ist es auch sogleich möglich, die Augen dieser neuen Aufgabe anzupassen, obgleich die Augen dabei das Gefühl ungewöhnlicher Anstrengung haben und bald ermüden. Daher denn überhaupt der Gebrauch einer Brille in der ersten Zeit, wo man sie zu tragen beginnt, immer mit einer merklichen Anstrengung verbunden ist, und umgekehrt Leute, die lange Zeit eine Brille getragen haben, wenn sie sie abnehmen, einen angestrengten und gleichsam scheuen Blick zeigen, selbst für solche Gegenstände, für welche sie akkommodieren können. Es ist dies eine allgemeine Erfahrung, daß wir gut eingeübte Gruppenbewegungen mit viel geringerer Anstrengung ausführen, als ungeübte. Man denke daran, welche Anstrengung ein ungeübter Schwimmer oder ein ungeübter Schlittschuhläufer aufwenden, um fort zu kommen, und wie leicht dasselbe nachher geht, wenn sie sich geübt haben. Gerade dasselbe geschieht bei den Augen, wenn wir ihre Bewegungen in ungewöhnlicher Weise kombinieren sollen.

Eine veränderte Verbindung von Konvergenz und Akkommodation kann man auch erreichen, wenn man stereoskopische Bilder betrachtet und deren Entfernung voneinander willkürlich verändert. Davon werden wir unten ausführlicher handeln.

Divergenz der Augen läßt sich ebenfalls bei der Betrachtung stereoskopischer Bilder erzielen, wenn man sie immer weiter voneinander entfernt und dabei ihre Vereinigung zu einem Bilde zu erhalten sucht. Ich kann auf diese Weise eine Divergenz meiner Blicklinien bis zu 8 Grad hervorbringen. Dasselbe läßt sich auch erreichen, wenn man zwei gleiche schwach brechende Glasprismen von 6 bis 8 Grad brechendem Winkel so vor beide Augen nimmt, daß die brechenden Winkel (die dünnsten Stellen der Prismen) nach unten sehen, und durch sie nach entfernten Gegenständen blickt. Dazu braucht man bei der angegebenen Haltung der Prismen parallele Gesichtslinien, die aber etwas mehr nach unten gerichtet sind, als ohne die Prismen. Wenn man nun die Prismen langsam dreht, so daß ihre brechenden Winkel sich beide nach außen zu wenden anfangen, so kann man doch noch die vorher gesehenen Gegenstände fortfahren zu fixieren und einfach zu sehen. Man muß dazu aber jetzt die Augen divergent stellen. Man kann dasselbe auch mit einem Prisma erreichen, wenn man dasselbe mit dem brechenden Winkel nach außen vor ein Auge hält, und zuerst nahe Gegenstände betrachtet, welche unter diesen Umständen noch konvergente oder parallele Blicklinien erfordern, und dann allmählich zu entfernteren Objekten übergeht, welche Divergenz verlangen.

Endlich haben sowohl DONDERS als ich selbst beobachtet, daß man verschiedene Erhebung beider Augen erzielen kann, wenn man ein schwach brechendes Prisma vor ein Auge nimmt, und den brechenden Winkel zuerst nach innen richtet. Blickt man so nach entfernten Gegenständen, so muß man die Gesichtslinien etwas konvergent stellen, was ohne Schwierigkeit zu erreichen ist. Jetzt drehe man das Prisma ganz langsam so, daß der brechende Winkel allmählich immer weiter nach unten rückt, und suche die Fixation des Objekts zu erhalten. Es gelingt dies nach einiger Übung. In diesem Falle sieht das freie Auge den Gegenstand direkt mit gerade auf ihn hingerichteter Blicklinie; das vom Prisma bedeckte Auge dagegen muß sich merklich nach unten wenden, um den Gegenstand zu fixieren. Hat man eine solche Stellung der Augen erreicht, so nehme man das Prisma plötzlich fort, man sieht dann das fixierte Objekt in untereinander stehenden Doppelbildern zum Zeichen, daß die beiden Blicklinien nicht gleich hoch gerichtet sind. Auch in der Richtung von oben nach unten bringe ich Abweichungen von 6^0 ohne Schwierigkeit zustande.

Aus diesen Tatsachen geht hervor, daß die Verbindung, welche zwischen den Bewegungen beider Augen besteht, nicht durch einen anatomischen Mechanismus erzwungen, sondern vielmehr durch den bloßen Einfluß unseres Willens veränderlich ist, und daß wir nur in der Bildung unserer Willensintentionen beschränkt sind, insofern diese nur auf den Zweck einfach und deutlich zu sehen gerichtet sein können.

Ich habe schon früher auf andere Erfahrungen aufmerksam gemacht, die dasselbe beweisen und mir auch von andern Beobachtern bestätigt worden sind. Wären die Augenbewegungen mittels eines anatomisch vorgebildeten Mechanismus koordiniert, so wäre zu erwarten, daß dieser desto widerstandsloser wirken würde im Zustande der Schläfrigkeit, wo die Energie des Willens gebrochen ist. Ich beobachte indessen regelmäßig, daß wenn ich abends beim Lesen schläfrig werde, oder nach einem langen Diner aus Rücksicht auf die Gesellschaft meine Augen offen zu halten strebe, ich Doppelbilder der vor mir liegenden Objekte sehe, welche bald nur zu große Divergenz, bald verschiedene Höhe, bald abnorme Raddrehungen der Augen anzeigen. Sowie ich durch dergleichen ungewöhnliche Doppelbilder aufmerksam gemacht mich ermuntere, gehen die Doppelbilder meist schnell wieder zusammen, und wenn ich sie dann willkürlich auseinander zu treiben suche, kommen nur die gewöhnlichen nebeneinander stehenden Doppelbilder zustande, die von zu großer oder zu geringer Konvergenz für das Objekt herrühren[1].

Dieselbe Art von Zwang nun, welche die Bewegungen beider Augen mit einander und mit der beiderseitigen Akkommodation verbindet, besteht auch betreffs der Raddrehung, die zu einer bestimmten Lage des Gesichtspunktes gehört, und es war von vornherein zu vermuten, daß auch die Raddrehung nur

[1] Herr E. HERING hat in seinen Beiträgen zur Physiologie, 4. Heft, S. 274, die Richtigkeit dieser Beobachtung bezweifelt. Er hat offenbar die Erscheinung, auf die es ankommt, nicht gesehen. Die zuletzt oben angeführte Beobachtung beweist, daß ich nicht in den Irrtum verfallen bin, den er mir zuschreibt, und der von jemandem, welcher auch nur ein wenig Übung in der Beobachtung von Doppelbildern hat, auch schwerlich begangen werden konnte, daß ich nämlich wegen schiefer Kopfhaltung nebeneinander stehende Bilder für übereinander stehend gehalten hätte.

deshalb unserm Willen entzogen sei, weil wir durch eine etwaige Veränderung derselben keinen bestimmten praktischen und wahrnehmbaren Erfolg erzielen können. Es ist mir jetzt gelungen, die Richtigkeit dieser Annahme direkt zu erweisen. Man kann nämlich auch die Raddrehung der Augen ganz erheblich verändern, wenn man dieselben unter Umstände bringt, wo sie nur bei veränderter Raddrehung einfach sehen können.

Zu dem Ende benutze ich zwei gleichschenkelige und rechtwinkelige Glasprismen. Wenn man durch ein solches Prisma parallel der Hypotenusenfläche hindurchsieht, wie Fig. 6 anzeigt, so wird der Lichtstrahl ab, wo er durch die Kathetenfläche des Prismas in dieses eintritt, gebrochen und gegen die Hypotenusenfläche hin abgelenkt, von dieser bei c unter gleichem Winkel reflektiert, und tritt dann bei d wieder aus dem Prisma aus. Wenn b und d gleich weit von der Hypotenusenfläche entfernt sind, so geht der Strahl ab nach dem Austritt aus dem Prisma in derselben Richtung fort, in der er eingetreten ist. Strahlen dagegen, welche wie ab' und ab'' nicht parallel der Hypotenusenfläche auffallen, und nach der Brechung von dieser (bei c' und c'') reflektiert werden, treten nachher aus dem Prisma so aus, daß der eintretende und austretende Strahl ab' und $d'e'$, oder ab'' und $d''e''$ gleiche Winkel mit der Hypotenusenfläche bilden. Ein solches Prisma wirkt also unter diesen Umständen wie ein Spiegel, aber mit dem Vorteile, daß die Richtung, in der der mittlere Teil des Spiegelbildes erscheint, unverändert bleibt. Indem der Beobachter in der Richtung ab durch das Prisma hindurchsieht, erblickt er die jenseits liegenden Gegenstände, aber so, daß Rechts in Links verkehrt ist, wenn die Hypotenusenfläche des Prismas senkrecht steht, oder Oben in Unten, wenn sie horizontal liegt.

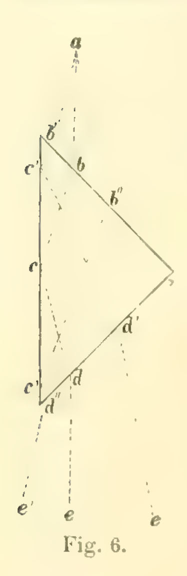


Fig. 6.

Wenn man nun den vom ersten Prisma reflektierten Strahl de in derselben Weise durch ein zweites Prisma gehen läßt, und die Hypotenusenflächen beider parallel liegen, so wird die Umkehrung der Bilder, welche das erste Prisma erzeugt hatte, durch das zweite, was noch einmal in derselben Weise umkehrt, wieder aufgehoben. Alle Gegenstände erscheinen durch zwei solche Prismen gesehen in ganz unveränderter Lage und Stellung. Macht man aber die Hypotenusenflächen der beiden Prismen nicht ganz parallel, sondern dreht das eine Prisma ein wenig um eine dem Strahl ae parallele Achse, wie in umstehender Fig. 7 S. 53, so wird die Umkehrung, welche das erste Prisma hervorbrachte, durch das zweite nicht vollständig wieder aufgehoben, sondern es bleibt eine kleine Drehung der gesehenen Gegenstände um den ungebrochenen Strahl ae als Achse zurück, welche doppelt so groß erscheint, als die wirkliche Drehung des einen Prismas gegen das andere ist. Übrigens können beide Prismen zusammen genommen, wenn sie nur gegeneinander festgestellt sind, beliebig um ihren gemeinsamen Achsenstrahl gedreht werden, ohne daß die scheinbare Lage der dadurch gesehenen Gegenstände eine Veränderung erlitte.

Wenn man nun eine solche Kombination zweier Prismen, welche eine scheinbare Raddrehung der Objekte um die Gesichtslinie von etwa 5 Grad hervorbringt, vor ein Auge nimmt und mit beiden Augen gleichzeitig entferntere Objekte betrachtet, die eine große Mannigfaltigkeit verschiedener deutlich abstehender Teile zeigen, so sieht man anfangs, wie zu erwarten ist, gekreuzte

Doppelbilder[1] der Objekte, die sehr auffallend und leicht zu bemerken sind. Wenn man aber fortfährt, die Objekte zu betrachten, und dabei den Blick vielfach über die einzelnen ausgezeichneten Punkte derselben herumwandern läßt, welche man alle nacheinander einfach sehen kann, so schwinden die Doppelbilder endlich, und man sieht vollständig einfache Bilder gerade so gut, wie beim gewöhnlichen Sehen. Wenn man nun einige Minuten lang in dieser Weise einfach gesehen hat, dann das Prismensystem fortnimmt und mit freien Augen dieselben Objekte betrachtet, so erblickt man jetzt im ersten Moment gekreuzte Doppelbilder, die sich aber schnell wieder vereinigen.

Den Verdacht, daß bei diesem Versuche die Doppelbilder nicht vereinigt, sondern nur übersehen werden, kann man erstlich dadurch beseitigen, daß man in einiger Entfernung vor die betrachteten Objekte ein senkrechtes Stäbchen hält, welches in Doppelbildern erscheint. Diese haben dann nur die gewöhnliche schwache Neigung zueinander, die Neigung der scheinbar vertikalen Meridiane. Daraus folgt also, daß die horizontalen Netzhautmeridiane hinter den Prismen so eingestellt werden, daß sie entsprechende gleiche Bilder empfangen.

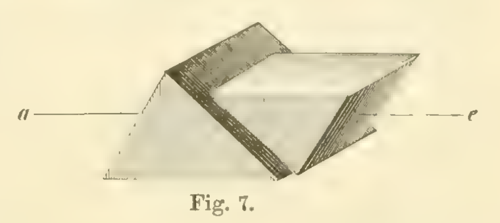


Fig. 7.

Ferner habe ich auch zur Kontrolle, während ich durch die Prismen sah, Nachbilder eines horizontalen Streifens in beiden Augen entwickelt, und diese, nachdem ich die Prismen entfernt hatte, auf eine weiße Fläche geworfen. Im ersten Augenblicke erschienen dann die Nachbilder beider Augen verschieden geneigt gegen ein und dieselbe objektive Linie des Gesichtsfeldes. Sobald aber die Augen in ihre natürliche Stellung zurückgegangen waren, erschienen beide Nachbilder in gleicher Lage im Gesichtsfelde. War die objektive Linie, von der die Nachbilder genommen wurden, horizontal, und das rechte Auge mit einem Doppelprisma bewaffnet, welches 5^0 nach links drehte, so erschienen die Nachbilder beider Augen, nachdem die Prismen entfernt und beide Augen in ihre normale Stellung übergegangen waren, etwas nach links gedreht, woraus folgte, daß beim Sehen durch das Prisma das linke Auge etwas nach rechts gedreht gewesen war, während das rechte Auge der scheinbaren Drehung des Gesichtsfelds folgend nach links gedreht war. Die Nachbilder beider Augen aber zeigten sich hierbei auf korrespondierenden Stellen entwickelt, und daraus folgt, daß auch korrespondierende Stellen beider Netzhäute das Urbild aufgenommen hatten. Aus diesen Versuchen folgt also, daß auch die Raddrehungen des Auges unter besonderen Umständen verändert werden können, wenn nämlich abnorme Drehungen dieser Art gebraucht werden, um die Objekte eines ausgedehnten und an Einzelheiten reichen Gesichtsfeldes in ungekreuzten Doppelbildern zu sehen. Die äußerste Drehung des Gesichtsfeldes, welcher ich bei diesen Versuchen mit den Augen folgen konnte, betrug 7 Grad. Dabei sind nun wahrscheinlich beide Augen um gleich viel, aber in entgegengesetztem Sinne gedreht worden, jedes also etwa um $3^1/_2$ Grad. Die abweichende Stellung der Augen wird dabei nicht unmittelbar durch den bloßen Anblick der Divergenz

[1] Ich verstehe hier unter gekreuzten Doppelbildern solche, die eine Raddrehung gegeneinander erlitten haben.

der Doppelbilder hervorgebracht, sondern erst durch eine Reihe korrespondierender Bewegungen beider Augen, indem diese das Gesichtsfeld nach allen Richtungen durchlaufen, so daß sie fortdauernd die Einheit des Fixationspunktes erhalten*.

Diese Erfahrungen an den Augenmuskeln sind von großer Wichtigkeit für die Lehre von der Willkürlichkeit der Bewegungen überhaupt. Gewöhnlich stellt man sich vor, daß die Fähigkeit, eine bestimmte willkürliche Bewegung auszuführen, gleich von vornherein durch die Natur gegeben sei, und nicht weiter gelernt zu werden brauche, außer etwa in den Fällen, wo wie beim Gehen, Stelzenlaufen, Schlittschuhlaufen, Schwimmen ein gewisses künstliches Gleichgewicht bei der Bewegung zu erhalten, oder die Wirkung anderer Naturkräfte dabei mit zu beachten sei. Es müssen aber auch für andere Bewegungen die dazu nötigen Willensintentionen erst gelernt werden. Selbst unter den Bewegungen der am freiesten gebrauchten Glieder unseres Körpers, wie z. B. der oberen Extremitäten findet man leicht Fälle der Art, welche erst eine besondere Einübung erfordern, ehe man sie ausführen kann. So kann man z. B. den horizontal ausgestreckten Arm im Schultergelenk um seine Längsachse rollen, ebenso Radius und Hand um die Ulna. Beide Rollungen werden durch Muskelgruppen ausgeführt, die ganz unabhängig voneinander sind. Wir sind aber nur geübt beide Rollungen in gleichem Sinne auszuführen, weil unsere Absicht unter gewöhnlichen Umständen nur dahin geht, die Hand in die eine oder andere Rotationsstellung zu bringen. Nun kann man die Aufgabe stellen, beide Rollungen in entgegengesetztem Sinne zu machen, so daß der Ellbogen sich dreht, die Hand aber stehen bleibt. Es ist dies eine Art der Bewegung, die keinerlei praktischen Zweck hat, und deshalb gewöhnlich niemals ausgeführt wird. Auch habe ich bisher noch niemand gefunden, der dies auf die erste Aufforderung hätte tun können. Und doch ist diese Bewegung ebensogut zu lernen, wie die abnormen Augenbewegungen. Man braucht nur mit der Hand einen festen Gegenstand zu fassen, und den Ellenbogen zu drehen, dann den Griff der Hand allmählich zu lockern, und dieselbe Bewegung zu machen, bis man die Hand ganz frei lassen kann. Bei diesem Beispiele finden wir also eine ganz ähnliche Beschränkung der Willkürlichkeit in der Kombination der Bewegungen, welche anfangs unüberwindlich scheint, und doch durch zweckmäßig geleitete Einübung überwunden werden kann.

Wir haben jetzt zu untersuchen, welche Ursachen bei der Einübung der Augenbewegungen darauf hinwirken können, daß nur gewisse bestimmte Raddrehungen mit den verschiedenen Richtungen beider Gesichtslinien verbunden werden.

Was zuerst das Gesetz von Donders betrifft, wonach der Raddrehungswinkel nur abhängt von der zeitweiligen Richtung beider Gesichtslinien, so ist leicht einzusehen, daß die Einhaltung dieses Gesetzes eine wesentliche Erleichterung und Sicherung für die Lösung der Aufgabe gewähren muß, trotz der Augenbewegungen und trotz der Verschiebungen der Netzhautbilder auf der Netzhaut ruhende Objekte als ruhend anzuerkennen. Wir lassen unseren Blick fortdauernd im Gesichtsfelde wandern, weil wir nur so nacheinander alle einzelnen Teile des Gesichtsfeldes möglichst deutlich sehen können. Daß wir sie mit beiden Augen möglichst deutlich sehen, wird zunächst dadurch erreicht, daß

* Vgl. hierüber Anm. 7 am Schlusse des Paragraphen. K.

wir beide Gesichtslinien auf den zeitweilig betrachteten Punkt hinrichten und die Augen für ihn akkommodieren. Dabei könnten die beiden Augen noch in beliebiger Weise um die Blicklinie als Achse gedreht werden, ohne daß wir aufhören würden mit beiden Augen den betreffenden Punkt zu fixieren. Wenn wir nun in dieser Weise ein mit ruhenden Objekten angefülltes Gesichtsfeld vor uns haben, so wechseln mit der Wanderung des Blicks auch fortdauernd die Empfindungen in den einzelnen Nervenfasern der Netzhaut. Wenn wir zur Betrachtung eines schon früher fixierten Objektes A zurückkehren, und nun eine andere Raddrehung der Augen brauchen wollten, als das erstemal, so würde zwar der Eindruck des fixierten Punktes auf die beiden Netzhautgruben derselbe sein wie früher, aber die Netzhautbilder der Nachbarschaft würden eine andere Lage auf der Netzhaut haben, die rings um die Netzhautgrube liegenden Nervenfasern würden ganz andere Lichteindrücke erhalten, als das erstemal; und um zu konstatieren, daß das Objekt trotz dieses veränderten Systems von Empfindungen doch dasselbe geblieben ist, müßten wir das Auge ganz in die alte Stellung auch in bezug auf die Raddrehung zurückführen, um zu prüfen, ob dann bei Herstellung der früheren Stellung auch der alte Eindruck wieder erhalten werde.

Da nun für das Erkennen der Objekte in der Regel beim natürlichen Sehen dadurch nichts gewonnen wird, daß wir sie mit veränderten Raddrehungen ansehen, und nur die Rückkehr in eine unverändert bleibende bestimmte Stellung nötig ist, um das ruhende Objekt als ruhend wiederzuerkennen, so werden wir von Anfang an uns gewöhnen müssen für bestimmte Richtungen der Gesichtslinien auch immer wieder bestimmte Grade der Raddrehung zu gebrauchen.

Bei hinreichender Einübung auf die Kenntnis der Veränderungen, welche die Empfindungen der Netzhaut bei Drehung des Auges um die Blicklinie erleiden, würde es zweifelsohne auch möglich werden, die unveränderte Lage der Objekte trotz des veränderten Netzhautbildes richtig zu beurteilen. Aber es würde dies eine neue und große Komplikation in der Einübung unseres Auges für die Gesichtswahrnehmungen sein, welche gar keinen Vorteil bringen würde, und der wir deshalb von vornherein aus dem Wege gehen[1].

Durch dieses Prinzip, welches ich das Prinzip der leichtesten Orientierung für die Ruhestellungen des Auges genannt habe, wird zunächst verlangt, daß jeder bestimmten Richtung beider Gesichtslinien bestimmte Werte der Raddrehung beider Augen zugehören, aber es wird noch nicht bestimmt, welche Werte zu nehmen seien.

Bisher haben wir nur den Fall untersucht, wo dasselbe Objekt zweimal nacheinander direkt angeblickt wurde; nun ist noch zu fordern, daß ein ruhendes Objekt als ruhend erkannt werde, wenn es einmal direkt und dann indirekt betrachtet wird.

[1] Ich habe früher (Archiv für Ophthalmologie, IX, 2. 156—157) noch hinzugefügt, daß auch die Lage der Objekte im Raume richtig beurteilt werden sollte. Dagegen hat Herr E. Hering den Einwand gemacht, daß die Beurteilung der Lage durch die Raddrehungen der Augen überhaupt gestört werde. In gewissen, aber freilich viel beschränkteren Fällen, als Herr Hering meint, ist das richtig, wie der nächste Abschnitt lehren wird, und deshalb habe ich die Orientierung über die wirkliche Lage der Objekte in der oben gegebenen Ableitung aus dem Spiele gelassen, und mich auf das Wesentliche beschränkt, daß ruhende Objekte als ruhend anerkannt werden.

Wir wollen die Untersuchung zunächst für ein einziges, isoliert gedachtes, Auge führen, und später zusehen, welche Veränderungen bei der Verbindung mit einem zweiten Auge einzutreten haben. Wir beschränken uns ferner auf die Annahme unendlich kleiner Verschiebungen des Auges; denn wenn die Anerkennung der Ruhe des Objekts erhalten bleibt während der unendlich kleinen Verschiebungen, die während der unendlich kleinen Zeitteilchen einer ausgedehnteren Bewegung stattfinden, so ist diese Anerkennung auch am Ende der Bewegung erhalten.

Wir wollen eine Anzahl von Netzhautpunkten mit a, b, c, d usw. bezeichnen, und es möge a das Zentrum der Netzhautgrube sein. Die Punkte des Bildes, welche auf diese Netzhautpunkte fallen, bezeichnen wir mit A, B C, D. Der Punkt A des Bildes ist also fixiert; der Punkt B sei von A, also, auch b von a nur um eine verschwindend kleine Größe entfernt. Jetzt gehe der Blick vom Punkte A des Bildes über auf den Punkt B, so daß jetzt B auf dem Zentrum a der Netzhaut abgebildet sei. Dabei werden die Punkte A, C, D usw. des Bildes auf andere Netzhautpunkte fallen, die wir mit α, γ, δ usw. bezeichnen wollen. Während also die frühere Empfindung des Punktes b übergeht auf a geht die Empfindung, welche a hatte, über auf α, die von c auf γ, die von d auf δ usw. Wenn nun dasselbe System von Empfindungsänderungen immer wieder eintritt, so oft wir die Empfindung, welche b hatte, durch einen Willensimpuls, der Bewegung zur Folge hat, übergehen lassen auf a, so werden wir lernen diesen Inbegriff von Änderungen als sinnlichen Ausdruck einer Augenbewegung zu betrachten, dem keine Änderung in den Objekten entspricht. Die Probe dafür wird sein, daß wir wiederum in jedem beliebigen Zeitmomente A fixieren können, und dann das erste System von Empfindungen unverändert wiederfinden. Es kommt aber eben darauf an, daß wir, auch ohne diese Probe anzustellen, während wir B fixieren, lernen, daß die beobachtete Änderung keine Änderung der Objekte ist.

Damit nun jedesmal, wenn die Fixation übergeht auf den dem Netzhautpunkte b korrespondierenden Punkt des Gesichtsfeldes, auch gleichzeitig α das bisherige Bild von a, γ das von c, δ das von d usw. empfange, ist es nötig, daß das Auge diese Bewegung immer durch Drehung um eine und dieselbe, in Beziehung zum Augapfel festgelegene Achse ausführe, welche wir mit $\mathfrak{B}$ bezeichnen wollen.

Nun ist b nur einer der dem Punkte a benachbarten Netzhautpunkte; es möge c ein anderer von a unendlich wenig entfernter und in anderer Richtung als b gelegener Punkt sein, so wird eine zweite im Augapfel festgelegene Drehungsachse $\mathfrak{C}$ existieren müssen, um den Blick in der Richtung ac zu verschieben, wenn diese Verschiebung immer mit der gleichen Verschiebung des Netzhautbildes auf der Netzhaut, also mit demselben Systeme von Empfindungsänderungen begleitet sein soll.

Jeden anderen Punkt F des Gesichtsfeldes in der Nähe des Fixationspunktes A werden wir mit dem Blicke alsdann erreichen können durch eine Drehung von gewisser sehr kleiner Größe um die Achse $\mathfrak{B}$ und durch eine zweite Drehung von gewisser sehr kleiner Größe um die Achse $\mathfrak{C}$. Da man nun bekanntlich bei unendlich kleinen Drehungen die Drehungsachsen nach dem Prinzipe des Kräfteparallelogramms zusammensetzen kann, und die Diagonale der Achsen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{C}$ immer in der durch $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{C}$ gelegten Ebene liegen muß, so folgt, daß das Auge sich beim Blicke nach F in dieselbe Stellung bringen

läßt bei einer einfachen Drehung um eine einzige in der Ebene 𝔅ℭ gelegene Drehungsachse, wie bei der Drehung erst um 𝔅, dann um ℭ. Und da es bei der Richtung des Blickes nach F nach dem Gesetze von Donders, welches wir eben zu begründen versucht haben, immer dieselbe Richtung haben muß, auf welchem Wege es auch dahin geführt sein mag, so folgt, daß der Übergang des Blickes von A nach F oder irgend einem andern von A unendlich wenig entfernten Punkte auszuführen ist durch Drehung des Augapfels um eine Drehungsachse, die immer in ein und derselben, relativ zum Augapfel fest liegenden Ebene 𝔅ℭ gelegen ist. Dies würde die Bedingung dafür sein, daß jede unendlich kleine Verschiebung des Blicks in allen Fällen, wo sie eintritt, immer von einem konstanten Systeme von Änderungen der Empfindung in den Sehnervenfasern begleitet ist, welches schließlich als der sinnliche Ausdruck der zu jener Verschiebung des Blicks gehörigen Augenbewegung kennen gelernt wird[1].

Daß die Drehungsachsen für irgendwelche sehr kleine Verschiebungen des Auges, die von einer bestimmten festen Stellung ausgehen, alle in einer und derselben Ebene liegen müssen, folgt, wie die unten folgende mathematische Behandlung zeigen wird, unmittelbar für alle Teile des Blickfeldes, wenn die Raddrehung eine kontinuierliche, nicht sprungweise sich ändernde Funktion der Richtung der Blicklinie ist. Das Prinzip der leichtesten Orientierung fordert, daß diese Ebene, wo möglich, relativ zum Augapfel fest sein müsse.

Es wird also am leichtesten sein, die Veränderungen der Empfindung bei der Bewegung des Augapfels als Ausdruck einer solchen Bewegung und nicht einer Bewegung der Objekte zu erkennen, wenn der Übergang des Blicks auf den dem Netzhautpunkte b entsprechenden Punkt des Gesichtsfeldes immer mit derselben Verrückung des Netzhautbildes auf der Netzhaut begleitet ist, unabhängig davon, welche Anfangslage der Augapfel hat. Es würde eine viel kompliziertere Einübung in dem Gebrauche des Auges verlangen, wenn die Objekte immer als ruhend erkannt werden sollten, trotzdem die genannte Verschiebung des Netzhautbildes beim Ausgange von verschiedenen Ausgangspunkten sich als verschieden erweisen sollte. Für unmöglich freilich würden wir eine Einübung der Art nicht von vornherein erklären können. Die Erfahrung lehrt aber, wie wir sehen werden, daß sie nicht besteht.

Die hier aufgestellte Bedingung für die leichteste Orientierung beim indirekten Sehen ist nämlich vom menschlichen Auge nicht vollständig erfüllt und kann auch, wie die nachfolgende analytische Behandlung des Problems zeigen wird, nicht vollständig erfüllt werden, ausgenommen für ein Feld, dessen Ausdehnungen gegen den Radius der Kugel verschwindend klein sind. Es ist schon oben angeführt worden, daß nach dem Listingschen Gesetze die Ebenen

[1] Herr E. Hering hat auf S. 274—283 seiner Beiträge zur Physiologie diese Ableitung als unhaltbar zu erweisen gesucht. Das Mißverständnis des ersten Prinzips, welches oben erwähnt wurde, wobei er eine Nebensache zur Hauptsache gemacht hat, wirkt hier weiter. Er erklärt das zweite Prinzip für überflüssig neben dem ersten. Das ist es nicht. Denn das erste Prinzip bezweckt nur, daß ruhende Objekte als ruhend erkannt werden, so oft die Blicklinie in dieselbe Richtung zurückkehrt, das zweite, daß sie auch bei verschiedener Richtung der Blicklinie als ruhend erkannt werden. Herr Hering zeigt weiter, daß wenn man das zweite Prinzip ohne das erste gebraucht, man Unsinn daraus ableiten kann. Ich habe aber das zweite Prinzip nie anders, denn als Ergänzung des ersten angewendet, auch ist es selbstverständlich, daß dies nicht geht. Ich hoffe in der oben gegebenen Darstellung meine Ideen genauer ausgedrückt und das genannte Mißverständnis beseitigt zu haben.

der Drehungsachsen bei verschiedenen Stellungen der Blicklinie auch verschiedene Lagen im Auge haben. Davon hängen nun gewisse Gesichtstäuschungen ab, die am deutlichsten zu beobachten sind an sehr entfernten Objekten, von deren wirklicher Lage man keine Erfahrungen hat, namentlich an den Gestirnen[1].

Man suche sich am gestirnten Himmel drei hinreichend helle und weit voneinander entfernte Sterne, die nahehin in einer geraden horizontalen Linie stehen. Wir wollen voraussetzen, sie schienen in einer geraden Linie zu stehen, wenn man das Gesicht soweit erhebt, daß die Primärstellung der Gesichtslinien auf den mittleren Stern gerichtet ist. Dann werden dieselben Sterne eine nach unten konkave Linie zu bilden scheinen, wenn man ihre Reihe mit dem Blicke durchläuft, während das Gesicht weniger gehoben wird, als vorher, die Augen im Kopfe also mehr; und sie werden wie eine nach unten konvexe Linie erscheinen, wenn das Gesicht mehr erhoben wird als früher und die Augen im Kopfe also gesenkt werden müssen, um nach den drei Sternen zu sehen. Der Grund dieser Täuschungen ist in den Raddrehungen des Auges zu suchen. Blickt man nach dem rechten Ende der Sternreihe, so sind bei gehobenem Blicke die Netzhauthorizonte gegen die Visierlinie so gedreht, daß ihre rechte Seite gehoben ist. Das rechte Ende der Sternenlinie erscheint dann gesenkt; ebenso das linke, wenn man nach dem links gelegenen Sterne blickt, die ganze Linie also als konkav nach unten; umgekehrt bei kinnwärts gewendetem Blick.*

Oder man vergleiche die Neigung, welche eine Reihe von Sternen, wie z. B. die drei Sterne im Schwanz des großen Bären, gegen den Horizont zu haben scheinen, indem man das Gesicht so wendet, daß die Sterne bald mit nach rechts oben, bald mit nach links oben gehobenen Augen betrachtet werden. Man wird finden, daß bei ersterer Stellung das obere Ende dieser Sternreihe sich scheinbar mehr nach links, im zweiten Falle mehr nach rechts, also immer gegen die Medianebene des Kopfes hin, neigt.

Es handelt sich bei diesen Beispielen nicht um Bestimmung einer absoluten Richtung der Sternreihen im Raume, als senkrecht oder horizontal, da eine solche bei der unbestimmten Form des imaginären Himmelsgewölbes selbst nie eine ganz bestimmte sein kann. Es handelt sich nur die Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung in der Richtung der angeschauten Bilder bei verschiedener Blickrichtung zu konstatieren, und es zeigt sich bei diesen Versuchen, daß wir bei stark peripherischen Stellungen der Augen abweichende Urteile über die Lage der Gesichtsobjekte im Gesichtsfelde oder auch über die Form, des Gesichtsfeldes fällen. Da nun, wie gesagt, in einem ausgedehnten Felde solche Raddrehungen der Augen, die dergleichen Inkonsequenzen hervorrufen, nicht ganz vermieden werden können, so kann nur gefordert werden, daß die Raddrehungen des Auges bei verschiedenen Stellungen der Gesichtslinie so gewählt werden, daß die Summe aller Fehler in der Orientierung, die aus den Raddrehungen des Auges herfließen, möglichst klein werde.

Die vollkommene Erfüllung des zweiten Prinzips würde fordern, daß bei allen Stellungen der Blicklinie die Ebene der Drehungsachsen immer dieselbe Lage im Augapfel hätte. Es würde dann nie eine Komponente der Drehung

[1] Bei dem früher von mir beschriebenen entsprechenden Versuche hat die Konvergenz der Augen einen eigentümlichen Einfluß, der im nächsten Abschnitte zu besprechen ist.

* Vgl. über diese Täuschungen Anm. 8 am Schlusse des Paragraphen. K.

vorkommen, deren Achse die Normale zu jener Ebene der Drehungsachsen wäre, welche Normale ich die atrope Linie des Auges zu nennen vorgeschlagen habe. Jede Drehung um diese atrope Linie, deren Lage im Auge zunächst noch unbestimmt bleibt, würde als ein Fehler zu betrachten sein. Die Forderung des zweiten Prinzips würde also so formuliert werden können, daß die Summe **dieser Fehlerquadrate für alle vorkommenden unendlich kleinen Bewegungen des Auges ein Minimum werde.** Die Quadrate der Fehler müssen hier aus denselben Gründen, wie bei den Fehlerausgleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate genommen werden.

Das Resultat der analytischen Behandlung dieses Problems, welche unten gegeben ist, ist folgendes: Damit die Summe der Fehler am kleinsten werde, muß die atrope Linie für jede Form des Feldes mit der Blicklinie zusammenfallen; die Verteilung der Raddrehungen aber hängt im allgemeinen von der Form des Feldes ab. In einem kreisförmigen Blickfelde würde das LISTINGsche Gesetz den Bedingungen der Aufgabe am vollkommensten entsprechen, und zwar mit der Primärstellung im Zentrum des kreisförmigen Feldes. In nicht genau, aber annähernd kreisförmigen Feldern würden gegen den Rand hin sich Abweichungen vom LISTINGschen Gesetze zeigen müssen, deren Größe aber durch den Umstand noch verringert werden kann, daß solche peripherische Stellen vom Blicke seltener durchlaufen werden, und wir, wie es scheint, auch diejenigen Bewegungsrichtungen des Auges zu vermeiden suchen, die dem Rande des Blickfelds parallel gehen und Scheinbewegungen der Objekte hervorbringen würden.

Es zeigt sich also hierbei, daß das LISTINGsche Gesetz der Augenbewegungen das vorteilhafteste für die Orientierung ist, zunächst für ein einzelnes Auge und für ein kreisförmiges Blickfeld.

Nun sehen wir aber mit zwei Augen, welche bald parallel, bald konvergierend gestellt werden. Das Prinzip der leichtesten Orientierung für Ruhestellungen fordert nur, daß die Raddrehungen der Augen dieselben seien, sobald dieselben Stellungen beider Augen wieder eintreten, und in der Tat finden wir kleine Abweichungen der Raddrehung bei Konvergenzstellungen von denen bei Parallelstellungen. Es werden aber beim normalen Sehen Parallelstellungen in der Regel nur in denjenigen Teilen des Gesichtsfeldes vorkommen, welche sehr weit entfernte Objekte darzubieten pflegen; das sind die oberen Teile des Feldes.

Im unteren Teile des Blickfeldes finden sich fast ausschließlich nahe Gegenstände vor; der entfernteste von ihnen ist der Fußboden. Das gemeinsame Blickfeld meiner beiden Augen bei paralleler Stellung habe ich in Fig. 8 gezeichnet, a ist die Primärstellung des fernsehenden Auges, die Länge des Pfeils, ac bezeichnet die entsprechende Entfernung des Auges von der Tafel, auf die das Blickfeld projiziert ist; die Augen befinden sich dabei in Richtung des in a errichteten Lotes. Nach unten hin ist das Sehfeld jedes Auges auf der innern Seite eingeengt durch die hervortretende Nase, bb der Figur; was vom Nasenrücken noch fixiert werden kann, ist durch Schattierung angedeutet. Dieser untere Teil, welcher von den Doppelbildern der Nase teilweise zugedeckt ist und der zwischen diesen Doppelbildern liegt, kann für parallele Augenstellungen fast gar nicht gebraucht werden, auch sind dieselben hier entschieden schwerer herzustellen, als im oberen Teile des Feldes. Wir können also etwa zwischen bb der Figur die Grenze ziehen für das Blickfeld der parallelen Gesichtslinien,

dann bleibt für sie ein nahehin kreisförmiges Feld übrig, und ich finde hier in der Tat das LISTINGsche Gesetz gültig, und die Primärstellung a in der Mitte dieses Feldes. Übrigens sind die beiden Felder meiner Augen nicht ganz symmetrisch; mein linkes Auge kann weiter nach unten und außen sehen als das rechte.

Bei Konvergenzstellungen bekommen die Augen zuerst eben wegen der Konvergenz eine Richtung nach innen, und zweitens überwiegend nach unten. Im oberen Teile des Blickfeldes kommen verhältnismäßig sehr selten nahe Gegenstände vor, die wir zu betrachten haben, auch sind wir nicht imstande, die Konvergenz dort so weit zu treiben, wie beim Blick nach unten. Daher sind für Konvergenzstellungen Abweichungen von dem Bewegungsgesetze der Parallelstellungen in dem Sinne zu erwarten, als ob die Primärstellung für sie tiefer und mehr nach innen liegt, als für die Parallelstellungen; von dieser Art sind in der Tat die Abweichungen in der oben in Fig. 4 gegebenen Übersicht. Die Stärke dieser Abweichungen wird dann wohl von der gewohnheitsmäßigen Häufigkeit der Konvergenzstellungen und ihrer Stärke abhängen müssen, und bei kurzsichtigen Augen, welche hauptsächlich in Konvergenz beobachten, werden sich die Eigentümlichkeiten solcher Konvergenzstellungen auch auf die verhältnismäßig seltener gebrauchten Fernstellungen übertragen können.

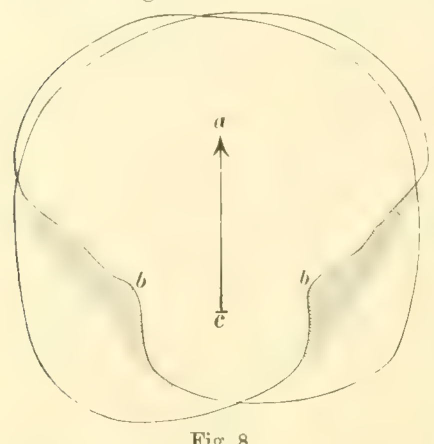


Fig. 8.

Bei dem hier gegebenen Versuche, das Gesetz der Augenbewegungen aus den Bedürfnissen des Wahrnehmens herzuleiten, mußte natürlich abstrahiert werden von aller Kenntnis und Schätzung der Längen und Winkel des scheinbaren Gesichtsfeldes, ja selbst von der Kenntnis der Anordnung der Netzhautpunkte auf der Netzhaut, weil diese Kenntnisse, wenn man sie nicht als angeboren ansieht, erst durch die Bewegungen des Auges gewonnen werden können. In Wirklichkeit wird beides sich wohl nebeneinander und gleichzeitig entwickeln müssen, und es soll deshalb die gegebene Ableitung des Drehungsgesetzes nicht als eine genaue Beschreibung des faktischen Entwickelungsgangs dieses Gesetzes während der ersten Kindheit angesehen werden. Vorläufig kann die empiristische Theorie der Gesichtswahrnehmungen in dieser Beziehung weiter nichts leisten, als nachweisen, daß in den Gesichtswahrnehmungen und bei den Bewegungen des Auges nichts vorkommt, was nicht durch Erfahrung und zweckmäßige Einübung unter dem Bestreben, die Objekte der Außenwelt möglichst genau und sicher zu erkennen, gewonnen werden könnte. Dabei wird natürlich der Gang dieser Einübung und Erfahrung methodischer und mehr in seine einzelnen Momente zerlegt dargestellt werden müssen, als er in Wirklichkeit in dem bunten Gedränge zufälliger Sinneseindrücke meistenteils vor sich gehen mag.

A. FICK und WUNDT haben als regelndes Prinzip für die Augenbewegungen hingestellt, daß diejenige Raddrehung gewählt werde, bei welcher die gewünschte Richtung der Blicklinie mit der geringsten Muskelanstrengung erreicht werden kann. Über die Durchführung dieses Prinzips wird unten das Nähere an-

gegeben werden. Wahrscheinlich ist dasselbe tatsächlich erfüllt bei den wirklich vorhandenen normalen Augenbewegungen. Indessen glaubte ich mich nicht bei diesem Prinzipe als dem letzten beruhigen zu dürfen, weil willkürliche Anstrengung nachweisbar diejenigen Stellungen des Augapfels herbeiführen kann, welche den Zwecken des Sehens am besten entsprechen, und die Muskeln im allgemeinen bildsam genug sind, daß diejenigen, von denen man die größere Anstrengung verlangt, auch bald die stärkeren werden. Indessen ist wohl nicht zu leugnen, daß wenn der Augenmuskelapparat vieler Generationen hintereinander sich den Bedürfnissen der Individuen angepaßt hat und sich seine Anordnung auf die Nachkommen vererbt, für die faktische Herbeiführung der zweckmäßigsten Raddrehungen des Auges der Umstand, daß sie die leichtesten sind, außerordentlich günstig einwirken muß. Die oben angeführten Versuche zeigen aber, daß die leichtesten Augenbewegungen für die Dauer dann nicht gewählt werden, wenn sie nicht auch gleichzeitig die vorteilhaftesten für das Sehen sind.

Ähnliche Gesetze wie für die Bewegungen der Augen gelten auch für die des Kopfes. Es hat schon Aubert bemerkt, wenn man den Kopf plötzlich nach einer Seite neigt, während man einen festen Punkt einer geraden vertikalen oder horizontalen Linie fixiert, so daß ihr Bild auf der Netzhaut eine Drehung erleidet, daß dann entweder bei der Bewegung des Kopfes eine scheinbare Drehung jener Linie eintritt, oder man wenigstens eine gewisse Unsicherheit fühlt, zu entscheiden, ob eine Drehung eingetreten sei oder nicht.

Die gewöhnlichen Bewegungen des Kopfes geschehen übrigens nach demselben Prinzip, wie die der Augen. Das Hinterhauptsgelenk besteht aus zwei Gelenken, dem zwischen Hinterhauptsbein und dem ersten Halswirbel oder Atlas, und dem Gelenke zwischen dem Atlas und dem zweiten Halswirbel. Das erste läßt eine Drehung um eine horizontal von rechts nach links gehende Achse, und in geringer Ausdehnung auch eine Drehung um eine horizontal von vorn nach hinten gehende Achse zu; das zweite genannte Gelenk hat nur eine vertikale Drehungsachse. Beide Gelenke zusammen können also mäßige Drehungen um alle beliebig gelegenen Achsen zulassen. Dazu kommt dann noch die Beweglichkeit der Halswirbelsäule. Wenn man die Augen weit nach rechts oder links wenden will, dreht sich der Kopf um eine senkrechte Achse im unteren Gelenke; wenn der Blick gerade nach oben oder unten gewendet wird, dreht sich der Kopf um die horizontal von rechts nach links gehende Drehungsachse der Gelenkknöpfe des Hinterhauptbeins; wenn er aber schräg nach rechts und oben gekehrt wird, so dreht er sich, wie das Auge, um eine von oben rechts nach unten links gehende Achse, so daß die rechte Seite des Kopfes höher zu stehen kommt, als die linke. Wenn der Blick dagegen nach unten rechts sich wendet, kommt die rechte Seite des Kopfes tiefer zu stehen. Es sind dies also Drehungen derselben Art, wie sie das Auge ausführt, wenn auch mit größerer Freiheit veränderlich, als die des Auges.*

Allgemeine geometrische Betrachtung der Drehungen. Man denke sich einen gewöhnlichen Erdglobus, der mit seiner Polachse drehbar in einem messingenen Ringe befestigt ist; dieser Meridianring möge selbst in Einschnitten des hölzernen Gestells verschoben und endlich das Gestell auf einem horizon-

* Über den Zusammenhang der Augen- und Kopfbewegungen vgl. Anm. 9 am Schluß des Paragraphen. K.

talen Tische stehend gedreht werden können, wobei es sich um die Lotlinie als Achse dreht. Eine solche Befestigungsweise reicht hin, um den Globus in alle möglichen Lagen zu versetzen. Der Globus möge den Augapfel darstellen und die Pollinie möge der Blicklinie entsprechen.

Im Anfang möge die Pollinie senkrecht stehen, und der erste Meridian des Globus, der von Ferro, in der Ebene des Ringes stehen. Die vertikalen Koordinaten (also der Blicklinie in ihrer Anfangsstellung parallel) nenne ich x, die Ebene des ersten Meridians und des Meridianringes sei die Ebene der xy, die y-Achse also horizontal in der Ebene des Ringes und die z-Achse senkrecht darauf. Alle diese Achsen sollen durch den Mittelpunkt der Kugel gehen. Da es ganz willkürlich ist, wie wir im Auge die y- und z-Achse legen, so wollen wir annehmen, die atrope Linie liege in ihrer Anfangslage in der y-Ebene. Es vereinfacht sich dadurch die Rechnung sehr merklich, ohne daß die Allgemeinheit derselben beinträchtigt wird. In dem Globus, der den Augapfel darstellen soll, würde also die atrope Linie irgendwo im Meridian von Ferro liegen.

Wir denken uns nun vier rechtwinklige Koordinatensysteme, welche alle in der Anfangslage der Kugel miteinander zusammenfallen. Das erste derselben nennen wir xyz, es sei absolut fest im Raume. Das zweite nennen wir $x_1 y_1 z_1$, es sei beweglich zugleich mit dem Gestell des Globus und mit diesem Gestelle fest verbunden; das dritte nennen wir $x_2 y_2 z_2$, es sei fest verbunden mit dem messingenen Meridianringe; das vierte endlich nennen wir $\xi v \zeta$, es sei fest mit der Kugel verbunden.

Wenn das Gestell auf dem Tische gedreht wird, so verschiebt sich das Koordinatensystem der $x_1 y_1 z_1$ gegen das der xyz; da aber die x-Achse Drehungsachse ist, so bleibt die x_1-Achse zusammenfallend mit der x-Achse, und die $y_1 z_1$-Ebene mit der yz-Ebene. Folglich ist auch nach der Drehung die Entfernung x_1 eines jeden beliebigen Punktes von der $y_1 z_1$-Ebene ebenso groß wie seine Entfernung x von der yz-Ebene. Es sei in Fig. 9 die Ebene des Papiers die Ebene der yz und $y_1 z_1$; es sei OA die Achse der y, OH die der z, OD die der y_1, OE die der z_1; C sei die Projektion

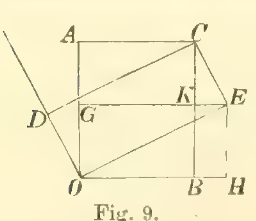


Fig. 9.

des Punktes, dessen Koordinaten gesucht werden. Man fälle von C die Lote CA, CB, CD, CE beziehlich auf die vier Koordinatenachsen, und endlich noch vom Punkte E die Lote EG und EH auf OA und OB, deren Schnittpunkt wir mit K bezeichnen, so ist

$$OA = CB = y \qquad OD = CE = y_1$$
$$OB = AC = z \qquad OE = CD = z_1.$$

Den Winkel EOH, um den das System der $x_1 y_1 z_1$ gegen das der xyz gedreht ist, nennen wir ϑ.

$$y = OA = OG + GA = OG + KC.$$

Da nun der Winkel $GEO = ECK = EOH = \vartheta$ ist, so ist

$$OG = OE \sin(GEO) = z_1 \sin\vartheta$$
$$KC = CE \cos(ECK) = y_1 \cos\vartheta,$$

folglich

$$y = y_1 \cos\vartheta + z_1 \sin\vartheta$$

und ebenso

$$z = OB = OH - KE$$
$$OH = OE \cos(EOH) = z_1 \cos\vartheta$$
$$KE = EC \sin(ECK) = y_1 \sin\vartheta,$$

also

$$z = z_1 \cos\vartheta - y_1 \sin\vartheta.$$

Wir haben also für die Koordinaten xyz des durch die $x_1 y_1 z_1$ gegebenen Punktes nach der Drehung folgende Werte:

$$\left.\begin{aligned} x &= x_1 \\ y &= y_1 \cos\vartheta + z_1 \sin\vartheta \\ z &= -y_1 \sin\vartheta + z_1 \cos\vartheta \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1).$$

Wenn ferner der Messingring des Globus in dem Gestelle gedreht wird, so ändert sich die Lage des Systems der $x_2 y_2 z_2$ gegen das der $x_1 y_1 z_1$, wobei die $y_2 x_2$-Ebene aber mit der $y_1 x_1$-Ebene in Kongruenz bleibt, und also auch die z_2-Achse mit der z_1-Achse. Der Drehungswinkel sei α, die Werte der Koordinaten $x_1 y_1 z_1$ findet man ausgedrückt in die der $x_2 y_2 z_2$ ähnlich wie vorher

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x_2 \cos\alpha - y_2 \sin\alpha \\ y_1 &= x_2 \sin\alpha + y_2 \cos\alpha \\ z_1 &= z_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{a}).$$

Endlich drehe man den Globus um seine Polachse, dabei verschiebt sich das System der $\xi v \zeta$ gegen das der $x_2 y_2 z_2$, während die ξ und x_2-Achse, als Drehungsachse, kongruent bleiben. Die Werte der $x_2 y_2 z_2$ sind, wenn der Drehungswinkel mit ω bezeichnet wird

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= \xi \\ y_2 &= v \cos\omega + \zeta \sin\omega \\ z_2 &= -v \sin\omega + \zeta \cos\omega \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{b}.$$

Nun setze man die Werte von $x_1 y_1 z_1$ aus 1a) in die Gleichungen 1); man erhält

$$x = x_2 \cos\alpha - y_2 \sin\alpha$$
$$y = x_2 \sin\alpha \cos\vartheta + y_2 \cos\alpha \cos\vartheta + z_1 \sin\vartheta$$
$$z = -x_2 \sin\alpha \sin\vartheta - y_2 \cos\alpha \sin\vartheta + z_2 \cos\vartheta.$$

In diese Gleichungen endlich setze man für $x_2 y_2 z_2$ deren Werte aus den Gleichungen 1b). Man erhält

$$\left.\begin{aligned} x &= \xi \cos\alpha - v \cos\omega \sin\alpha - \zeta \sin v \sin\alpha \\ y &= \xi \sin\alpha \cos\vartheta + v(\cos\alpha \cos\vartheta \cos\omega - \sin\vartheta \sin\omega) \\ &\qquad + \zeta(\cos\alpha \cos\vartheta \sin\omega + \sin\vartheta \cos\omega) \\ z &= -\xi \sin\alpha \sin\vartheta - v(\cos\alpha \sin\vartheta \cos\omega + \cos\vartheta \sin\omega) \\ &\qquad - \zeta(\cos\alpha \sin\vartheta \sin\omega - \cos\vartheta \cos\omega) \end{aligned}\right| \quad \ldots \quad 1\text{c}).$$

Dadurch sind die Raum-Koordinaten xyz jedes Punktes gegeben, der durch seine Koordinaten $\xi v \zeta$ auf oder in der Kugel gegeben ist.

Bestimmen wir zunächst die Lage der Polachse, welche der Blicklinie des Auges entsprechen soll; sie ist die Achse der ξ, für ihre Punkte ist $v = \zeta = 0$. Daraus folgt dann für einen Punkt der Polachse, welcher um ξ vom Drehpunkte entfernt ist

$$x = \xi \cos \alpha$$
$$y = \xi \sin \alpha \cos \vartheta$$
$$z = -\xi \sin \alpha \sin \vartheta\,.$$

Der Winkel zwischen der Polachse und ihrer Anfangsstellung ist also α, und die Projektion der Polachse auf die Horizontalebene ist $\xi \sin \alpha$, welche mit der xy-Ebene den Winkel ϑ macht. Diese Projektion ist nun aber die Schnittlinie einer durch die vertikale x-Achse und die Polachse ξ gelegten Ebene mit der Horizontalebene. Übertragen wir diese Verhältnisse auf das Auge, so ist

α der Winkel zwischen der ersten und zweiten Lage der Blicklinie

ϑ der Winkel, den eine durch die erste und zweite Lage gelegte Ebene mit der ursprünglichen xy-Ebene bildet.

Durch beide Winkel ist die Richtung der Blicklinie gegeben.

Um nun noch den Sinn des Winkels ω für die Verhältnisse am Auge anschaulich zu machen, wollen wir fragen, wie muß der Winkel ω gewählt werden, wenn sich das Auge nach dem Gesetze von Listing bewegt, und die Anfangslage, wo die xyz mit den $\xi v \zeta$ zusammenfallen, seine Primärlage ist. Dann müßte nach diesem Gesetze die neue Stellung die gleiche sein, als wäre das Auge durch Drehung um eine in der $v\zeta$- und yz-Ebene liegende Drehungsachse in die neue Lage übergeführt worden. Da die Punkte der Drehungsachse unveränderte Lage behalten, so muß für sie auch nach der Drehung

$$x = \xi \qquad y = v \qquad z = \zeta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

sein. Durch diese drei Bedingungen können wir in allen Fällen die Lage der Drehungsachse finden. Da der Forderung des Listingschen Gesetzes gemäß die Drehungsachse in der $v\zeta$-Ebene liegen, das heißt für ihre Punkte $\xi = 0$ sein soll, so erhalten wir aus den Gleichungen 1c) nach Einsetzung dieser Werte

$$o = -v \cos \omega \sin \alpha - \zeta \sin \omega \sin \alpha$$
$$v = v(\cos \alpha \cos \vartheta \cos \omega - \sin \vartheta \sin \omega) + \zeta(\cos \alpha \cos \vartheta \sin \omega + \sin \vartheta \cos \omega)$$
$$\zeta = -v(\cos \alpha \sin \vartheta \cos \omega + \cos \vartheta \sin \omega) - \zeta(\cos \alpha \sin \vartheta \sin \omega - \cos \vartheta \cos \omega).$$

Aus der ersten Gleichung folgt:

$$v \cos \omega + \zeta \sin \omega = 0\,,$$

was erfüllt wird, wenn wir setzen

$$v = h \sin \omega\,, \qquad \zeta = -h \cos \omega\,,$$

worin h eine willkürliche Größe bedeutet. Dadurch reduzieren sich die beiden andern Gleichungen auf die Bedingungen

$$\sin \omega = -\sin \vartheta$$
$$-\cos \omega = -\cos \vartheta\,,$$

die zu erfüllen sind durch die Annahme

$$\omega = -\vartheta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2a).$$

Dies ist also die Bedingung, daß die durch die Gleichungen 1c) gegebenen Drehungen dem Listingschen Gesetze folgen. Dann werden die Werte x, y, z

$$\left.\begin{aligned} x &= \xi \cos \alpha - v \cos \vartheta \sin \alpha + \zeta \sin \vartheta \sin \alpha \\ y &= \xi \sin \alpha \cos \vartheta + v(\cos \alpha \cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta) \\ &\quad + \zeta(1 - \cos \alpha) \sin \vartheta \cos \vartheta \\ z &= -\xi \sin \alpha \sin \vartheta - v(\cos \alpha - 1) \sin \vartheta \cos \vartheta \\ &\quad + \zeta(\cos \alpha \sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta) \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 2b).$$

Zu bemerken ist noch, daß überhaupt, auch abgesehen von LISTINGS Gesetz, die Summe $\omega + \vartheta$ für sehr kleine Werte von α jedenfalls verschwindend klein werden muß, wenn nicht Verschiebungen der Blicklinie um unendlich kleine Werte von α endliche Lagenveränderungen des Auges ergeben sollen.

In den Gleichungen 2b) ist x die Entfernung des Punktes, dessen Koordinaten hier gegeben sind, von der yz-Ebene; ξ ist die Entfernung desselben Punktes von der $v\zeta$-Ebene. Beide sind positiv genommen, wenn sie vor der Vorderseite dieser Ebenen liegen. Setzt man nun

$$x = -\xi \qquad \text{oder} \qquad x + \xi = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2c),$$

so ist dies die Gleichung aller der Punkte, die gleichweit von der Vorderseite der Ebene $x = 0$ und von der Hinterseite der Ebene $\xi = 0$ abstehen. Diese Eigenschaft kommt aber den Punkten derjenigen Ebene zu, welche den Winkel ϑ, den die Ebenen $x = 0$ und $\xi = 0$ miteinander machen, halbiert. Die Gleichung 2c) ist also die Gleichung dieser Halbierungsebene. Diese Gleichung wird, wenn man den Wert von x aus 2b) entnimmt

$$0 = \xi(1 + \cos\alpha) - v\cos\vartheta\sin\alpha + \zeta\sin\vartheta\sin\alpha \quad . \; . \; . \; . \quad 2d).$$

Indem wir diese Gleichungen mit dem Faktor

$$\frac{1 - \cos\alpha}{\sin\alpha}$$

multiplizieren, erhalten wir

$$0 = \xi\sin\alpha - v\cos\vartheta(1 - \cos\alpha) + \xi\sin\vartheta(1 - \cos\alpha) \quad . \; . \; . \quad 2e).$$

Multiplizieren wir diese letztere mit $\cos\vartheta$, so erhalten wir

$$0 = \xi\sin\alpha\cos\vartheta + v(\cos\alpha\cos^2\vartheta - \cos^2\vartheta) + \zeta\cos\vartheta\sin\vartheta(1 - \cos\alpha).$$

Bei der Vergleichung mit dem Werte von y in 2b) zeigt sich, daß diese identisch ist mit

$$v = y.$$

Eine entsprechende Gleichung, welche man durch Multiplikation von 2e) mit $\sin\vartheta$ erhält, ist identisch mit

$$\zeta = z.$$

Für die Punkte der Halbierungsebene des Winkels ϑ, den die Ebenen $x = 0$ und $\xi = 0$ miteinander machen, ist also

$$x = -\xi, \qquad y = v, \qquad z = \zeta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2f).$$

Nehmen wir nun eine zweite Stellung des Bulbus, für die wir die Werte von $x, y, z, \alpha, \vartheta$ beziehlich mit $x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \vartheta_0$ bezeichnen, so ist für die Halbierungsebene des Winkels ϑ_0, welchen die Ebenen $x_0 = 0$ und $\xi = 0$ miteinander machen, ebenfalls

$$x_0 = -\xi, \qquad y_0 = v, \qquad z_0 = \zeta.$$

Wenn also der Punkt $\xi v \zeta$ gleichzeitig beiden Halbierungsebenen angehört, das heißt in deren Schnittlinie liegt, so ist für ihn

$$x = x_0, \qquad y = y_0, \qquad z = z_0.$$

Die Punkte der genannten Schnittlinie haben also dieselbe Lage im Raume bei der ersten wie bei der zweiten Stellung des Auges, und daraus folgt, daß

wenn man das Auge aus der ersten in die zweite Stellung durch Drehung um eine konstante Achse überführen will, die genannte Schnittlinie der Halbierungsebenen dabei als Achse zu benutzen ist. Die Lage dieser Achse ist gegeben durch die Gleichung 2b) und die analoge Gleichung für die zweite Stellung

$$x + \xi = 0 \quad \text{und} \quad x_0 + \xi = 0 .$$

Der Winkel, durch den der Bulbus um die resultierende Drehungsachse hierbei gedreht werden muß, um die erste Stellung in die zweite überzuführen, ist doppelt so groß, als der Winkel, unter dem sich die genannten beiden Halbierungsebenen $x + \xi = 0$ und $x_0 + \xi = 0$ gegenseitig schneiden.

Die hier gegebene Regel, nach welcher das Resultat zweier aufeinander folgender Drehungen auf eine einzige Drehung reduziert wird, kann ganz unabhängig vom Listingschen Gesetze auf jeden Körper übertragen werden, der sich um einen Punkt dreht. Wenn ein solcher Körper nacheinander um zwei verschiedene Achsen gedreht wird, und man kennt die Lage beider Achsen, die sie haben, während die Drehung um sie geschieht, oder, was dasselbe ist, die sie haben nach der ersten Drehung und vor der zweiten Drehung, so lege man durch beide Achsen eine Ebene, welche A heißen mag und konstruiere die Lage dieser Ebene, welche sie hat vor der ersten Drehung, A_0, und diejenige, welche sie hat nach der zweiten Drehung, A_1. Da die Drehungsachsen die Schnittlinien von A_0 und A, sowie von A_1 und A sind, so ist dies ohne Schwierigkeit auszuführen, sobald man die Größe der Drehungswinkel kennt, welches der Winkel $A_0 A$ und $A_1 A$ sind. Man konstruiere die Halbierungsebenen beider Winkel; deren Schnittlinie ist die resultierende Drehungsachse, der doppelte Wert des Winkels, unter dem sich die beiden Halbierungsebenen schneiden (gleichgültig welchen von den beiden Winkeln man nimmt), ist der Drehungswinkel.

Wenn die Drehungen unendlich klein sind, so liegt die resultierende Drehungsachse unendlich wenig von der Ebene entfernt, welche die beiden anderen Achsen enthält, und fällt im Grenzfalle mit der Diagonale des Parallelogramms zusammen, dessen zwei Seiten der Richtung nach mit den beiden Drehungsachsen zusammenfallen und eine der Größe der Drehungswinkel proportionale Länge haben.

Wir kehren zurück zu den Folgerungen aus dem Listingschen Gesetze für die Bewegungen des Bulbus. Da die Drehungsachse, um welche das Auge zu drehen ist, um es aus der Stellung der Gleichungen 2b) überzuführen in irgendeine andere Stellung mit den Koordinaten x_0, y_0, z_0, jedenfalls in der Ebene $x + \xi = 0$ liegt, welches auch die zweite Stellung sei, so folgt, daß jedesmal, wo man von einer bestimmten Anfangsstellung des Bulbus in beliebige andere Stellungen durch Drehung um feste Achsen übergehen will, diese Drehungsachsen alle in einer gewissen Ebene liegen müssen, deren Lage nur von der Anfangsstellung abhängt, nicht von der zu erreichenden Stellung, und daß ferner jede Drehung von beliebiger Größe um eine der in der genannten Ebene liegenden Achsen das Auge aus der zugehörigen Anfangsstellung immer wieder in neue Stellungen überführt, die dem Listingschen Gesetze entsprechen.

Die Primärstellung der Blicklinie ist also nur dadurch ausgezeichnet, daß die zugehörige Ebene der Drehungsachsen auf der Blicklinie senkrecht steht.

Die Lage der Normale auf der Ebene der Drehungsachsen für irgendeine Lage der Blicklinie findet man also, wenn man den Winkel zwischen der zeitigen

Lage der Blicklinie und ihrer Primärstellung halbiert. Man kann diese Normale die zeitige atrope Linie für die betreffende Augenstellung nennen.

Bei jeder fortgesetzten Drehung um eine Achse, welche das Auge in Übereinstimmung mit dem LISTINGschen Gesetze ausführt, wird die zeitweilige atrope Linie der Anfangsstellung einen größten Kreis auf dem kugeligen Blickfelde beschreiben, weil sie senkrecht zur Drehungsachse im Drehpunkte steht. Die Blicklinie aber, welche im allgemeinen nicht senkrecht zur Drehungsachse, wird keinen größten Kreis, sondern einen Parallelkreis zum größten Kreise der relativ atropen Linie ihrer Anfangsstellung beschreiben.

Es sei in Fig. 10 O der Drehpunkt des Auges, AO die Primärstellung der Blicklinie, OB eine zweite Stellung derselben. Der Kreis $ACBDF$ stelle den Durchschnitt des kugelig gedachten Blickfeldes vor. Der Winkel AOB werde halbiert durch GOC, so ist GOC die atrope Linie für die Stellung der Blicklinie in OB, und wenn OD ein Lot zu OC ist, so würde eine senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch OD gelegte Ebene die Ebene der Drehungsachsen für OB sein. Nun ist leicht zu sehen, daß wenn wir AO bis F verlängern, die Winkel BOD und FOD gleich sind, da sie die Komplemente der gleichen Winkel BOC und GOF sind. Daraus folgt weiter, daß wenn OE irgendeine andere Achse in der durch OD gelegten Ebene der Drehungsachsen ist, auch die Winkel BOE und FOE gleich sein müssen.

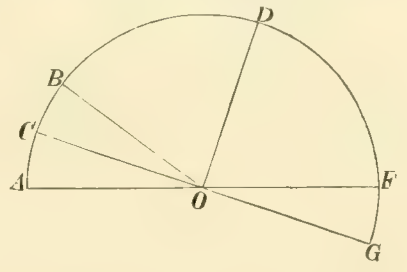


Fig. 10.

Wenn man also den Bulbus um die Achse OE ganz herumdrehen könnte, würde die Linie OB auch in die Lage OF kommen müssen. Folglich müssen auch die Kreise, welche die Blicklinie, ausgehend von der Stellung OB, bei der Drehung um eine feste Achse dem LISTINGschen Gesetze gemäß im kugeligen Blickfelde beschreibt, alle durch den Punkt F gehen. Die Lage des Punktes F ist aber ganz unabhängig von der Lage von OB, nur abhängig von der Primärstellung OA. Wir können ihn den Occipitalpunkt des Blickfeldes nennen. Daraus folgt:

> Alle Kreisbögen, welche die Blicklinie bei der Drehung um eine feste Achse dem LISTINGschen Gesetze gemäß im kugeligen Blickfelde beschreibt, gehen verlängert durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes.

Und umgekehrt:

> Wenn die Blicklinie dem LISTINGschen Gesetze entsprechend einen Kreisbogen im kugeligen Blickfelde beschreibt, der durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes geht, so dreht sie sich dabei um eine festbleibende Achse, die senkrecht zur Ebene des betreffenden Kreises ist.

Wir wollen diese Kreise des kugeligen Blickfeldes, welche durch den Occipitalpunkt gehen, Direktionskreise nennen. Ihre Wichtigkeit für die Orientierung wird sich noch in den nächsten Abschnitten mehr zeigen. Die Direktionskreise sind also größte Kreise des Blickfeldes nur, wenn sie durch die

Primärstellung der Blicklinie gehen, deren Ort im Blickfelde wir den **Hauptblickpunkt** nennen können.

Es ergibt sich ferner leicht, daß wenn ein linienförmiges Nachbild im Auge entwickelt ist, welches sich in das Blickfeld auf einen Direktionskreis der betreffenden Stellung der Blicklinie projiziert, und das Auge in Richtung dieses Direktionskreises bewegt wird, das Nachbild seine scheinbare Lage in diesem Direktionskreise behalten und sich nur in Richtung seiner eigenen Länge verschieben wird. Und wenn ein Nachbild entwickelt ist, welches durch den Blickpunkt senkrecht zu einem der betreffenden Direktionskreise schneidet, es bei der Bewegung des Blicks in diesem Direktionskreise senkrecht zu demselben bleiben wird.

Endlich ist auch leicht einzusehen, daß das Nachbild kongruieren wird mit der Richtung aller derjenigen Direktionskreise, die im Occipitalpunkt die gleiche Tangente mit demjenigen haben, mit dem es zuerst kongruierte.

Die Gleichung der Direktionskreise, welche durch eine bestimmte Stellung der Blicklinie hindurchgehen, z. B. durch die in den Gleichungen 2b) gegebene, ergibt sich leicht aus der Bedingung, daß sie durch eine Ebene, welche durch den Occipitalpunkt geht, aus dem kugelförmigen Blickfelde ausgeschnitten werden, dessen Mittelpunkt der Drehpunkt des Auges, der Anfangspunkt unserer Koordinaten ist. Es sei also die Gleichung des kugelförmig gedachten Blickfeldes

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3).$$

Die allgemeine Gleichung einer Ebene ist

$$ax + by + cz = A.$$

Die Koordinaten des Occipitalpunktes sind

$$x = -R, \qquad y = 0, \qquad z = 0.$$

Diese in die Gleichung der Ebene gesetzt, müssen dieser genügen, also

$$-aR = A.$$

Dadurch ist die unbekannte Größe A bestimmt, und die Gleichung einer beliebigen Ebene, die durch den Occipitalpunkt geht, wird also

$$ax + by + cz = -aR \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3a).$$

Die beiden Gleichungen 3) und 3a) sind also die Gleichungen eines beliebigen Direktionskreises.

Schreiben wir diese beiden Gleichungen wie folgt:

$$x^2\left(1 + \frac{y^2}{x^2} + \frac{z^2}{x}\right) = R^2,$$

$$x^2\left(1 + \frac{b}{a}\frac{y}{x} + \frac{c}{a}\frac{z}{x}\right)^2 = R^2$$

und dividieren sie durcheinander, so erhalten wir

$$1 + \frac{y^2}{x^2} + \frac{z^2}{x^2} = \left(1 + \frac{b}{a}\frac{y}{x} + \frac{c}{a}\frac{z}{x}\right)^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3b)$$

Dies ist die Gleichung eines Kegels, dessen Spitze im Anfangspunkt der Koordinaten liegt, und der durch den Direktionskreis hindurchgeht. Das letztere ist

der Fall, weil wir die Gleichung 3b) aus den Gleichungen 3) und 3a) abgeleitet haben, in denen x, y, z die Koordinaten eines beliebigen Punktes des Direktionskreises bezeichnen, und ein Kegel ist die in 3b) gegebene Fläche, weil die Gleichung 3b), wenn sie erfüllt wird durch die Koordinaten eines Punktes x, y, z, auch erfüllt wird durch die Koordinaten aller derjenigen Punkte, für welche die Verhältnisse $\frac{y}{x}$ und $\frac{z}{x}$ dieselben Werte haben.

Wenn aber $\frac{y}{x} = C_0$ und $\frac{z}{x} = C_1$ gesetzt werden, so sind dies die Gleichungen einer geraden Linie, die durch den Mittelpunkt der Koordinaten geht. Da also alle Punkte einer geraden Linie, die durch den Mittelpunkt der Koordinaten und durch einen Punkt der Fläche 3b) geht, ganz in dieser Fläche liegt, so ist diese Fläche eine Kegelfläche.

Die geraden Linien, die in der Oberfläche dieses Kegels zu ziehen sind, sind die Richtungen, welche die Blicklinie annimmt, wenn sie den betreffenden Direktionskreis durchläuft.

Wenn ein linienförmiges Nachbild in Richtung eines Direktionskreises entworfen wird, so bleibt, wie wir hervorgehoben haben, das Nachbild in dem Direktionskreise liegen, wenn das Auge dessen einzelne Punkte durchläuft. Oben haben wir die Nachbilder auf eine Ebene projiziert, die senkrecht zur Primärstellung des Auges war, deren Gleichung also ist

$$x = C.$$

Setzen wir in 3b) das x konstant, so wird 3b) die Gleichung einer Hyperbel, welche die Projektion des Direktionskreises auf die genannte Ebene ist. Sie ist

$$0 = (b^2 - a^2)\,y^2 + (c^2 - a^2)\,z^2 + 2\,b\,c\,y\,z + 2\,a\,b\,x\,y + 2\,a\,c\,x\,z \quad . \; . \quad 3c).$$

In dieser allgemeinen Form gibt die Gleichung alle Hyperbeln, längs welcher irgendwie gerichtete linienförmige Nachbilder verschoben werden können.

Beschränken wir uns dagegen auf solche, welche ursprünglich einer bestimmten Richtung parallel waren, z. B. der z-Achse, so ist in der Gleichung des Direktionskreises 3a) die Konstante $c = 0$ zu setzen, und setzen wir ferner

$$a = -\sin\frac{\alpha}{2}, \qquad b = +\cos\frac{\alpha}{2},$$

so wird die Gleichung 3c)

$$0 = y^2 \cos\alpha - z^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} - x\,y \sin\alpha$$

oder

$$\cos\alpha\left(y - \frac{1}{2}\,x \operatorname{tg}\alpha\right)^2 - z^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{4}\,x^2 \cos\alpha \operatorname{tg}^2\alpha.$$

Setzt man

$$\frac{1}{2}\,x \operatorname{tang}\alpha = f$$

und

$$x\sqrt{\frac{\operatorname{tang}\alpha}{2\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}} = g,$$

so wird die Gleichung der Hyperbel

$$\frac{(y-f)^2}{f^2} - \frac{z^2}{g^2} = 1 .$$

Es ist also f die reelle Achse, g die imaginäre, und der Mittelpunkt der Hyperbel um die Länge der reellen Achse von der Linie $z = 0$ entfernt. Der eine Scheitel aller dieser Hyperbeln liegt in der x-Achse, im Punkte $z = 0$, $y = 0$, aber diejenigen Zweige der Hyperbeln, welche durch diesen Punkt gehen, sind keine optischen Projektionen des betreffenden Direktionskreises. Sie sind vielmehr nur geometrische Projektionen der hinteren nicht sichtbaren Hälfte des Direktionskreises. Hyperbeln dieser Art sind oben konstruiert in Fig. 1.

Es bleibt noch übrig, die Drehung zu bestimmen, welche nach dem LISTINGschen Gesetze das Auge in Beziehung auf die Visierebene erleidet. Es sei die Ebene $v = 0$ der Netzhauthorizont des Auges, und $y = 0$ also seine Primärstellung, und gleichzeitig die Primärstellung der Visierebene. Die y-Achse ist dann die Linie, welche die Drehpunkte beider Augen verbindet. Die Visierebene muß also immer durch die y-Achse gehen. Die allgemeine Gleichung solcher Ebenen ist

$$a x + b z = 0 .$$

Für die Blicklinie ist $v = \zeta = 0$, also nach 2b)

$$x = \xi \cos\alpha , \qquad y = \xi \sin\alpha \cos\vartheta , \qquad z = -\xi \sin\alpha \sin\vartheta$$

und da die Blicklinie in der Visierebene liegen muß, folgt, daß diese Werte von x und z der allgemeinen Gleichung der Visierebene genügen müssen, also

$$a\,\xi \cos\alpha - b\,\xi \sin\alpha \sin\vartheta = 0.$$

Dem genügen wir, wenn wir setzen

$$a = \sin\alpha \sin\vartheta , \qquad b = \cos\alpha .$$

Die Gleichung der Visierebene wird also

$$x \sin a \sin\vartheta + z \cos\alpha = 0 ,$$

oder wenn wir die Werte aus 2b) einsetzen

$$0 = v \cos\vartheta \sin\vartheta (1 - \cos\alpha) - \zeta(\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4).$$

Wenn die Gleichungen zweier Ebenen sind

$$a x + b y + c z + d = 0$$

$$\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta = 0 ,$$

so ist der Winkel k, den sie miteinander machen, bekanntlich

$$\cos k = \frac{a\alpha + b\beta + c\gamma}{\sqrt{\alpha^2 + b^2 + c^2}\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} .*$$

Daraus folgt, daß der Winkel, den die Visierebene der Gleichung 4) mit dem Netzhauthorizont macht, dessen Gleichung ist

$$0 = v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4a)$$

* Die Rechnung enthält im folgenden ein, die Ergebnisse allerdings nicht beeinflussendes Versehen. Ich gebe daher in Anm. 10 am Schlusse des Paragraphen die berichtigte Darstellung der 2. Auflage. K.

gegeben wird durch die Gleichung

$$\cos k = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta (1 - \cos\alpha)}{\sqrt{\sin^2\vartheta + \cos^2\alpha \cos^2\vartheta}}$$

oder

$$\operatorname{cotang} k = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta (1 - \cos\alpha)}{\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4\text{b}).$$

Der Winkel k, welcher zwischen der zeitigen Lage des Netzhauthorizonts und der Visierebene liegt, ist hierdurch gegeben.

Der Winkel k' zwischen der Ebene des ursprünglich senkrechten Meridians $\zeta = 0$ und einer durch die senkrechte z-Achse und die Blicklinie gelegten Ebene

$$x \sin\alpha \cos\vartheta - y \cos\alpha = 0$$

wird in ähnlicher Weise gefunden

$$\operatorname{tg} k' = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta (1 - \cos\alpha)}{\sqrt{\cos^2\vartheta + \sin^2\vartheta \cos\alpha}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4\text{c}).$$

Nun sind häufig nicht die Winkel α und ϑ zur Abmessung der Stellung der Blicklinie gebraucht worden, sondern entweder der Erhebungswinkel λ und Seitenwendungswinkel μ, wie sie oben definiert wurden, oder die Winkel, welche FICK die *Longitudo* und *Latitudo* genannt hat, die mit l und m bezeichnet werden mögen. Diese sind noch in die Formeln 4b) und 4c) einzuführen, um sie zur Berechnung so ausgeführter Versuche geschickt zu machen.

Der Erhebungswinkel λ ist der Winkel zwischen der Visierebene

$$x \sin\alpha \sin\vartheta + z \cos\alpha = 0$$

und der Ebene $x = 0$, seine Tangente ist hiernach

$$\operatorname{tang}\lambda = \frac{z}{x} = -\operatorname{tang}\alpha \sin\vartheta .$$

Der Seitenwendungswinkel ist gleich dem Winkel zwischen der Äquatorialebene des Auges $\xi = 0$ und der Ebene, welche durch die y-Achse senkrecht zur Visierebene geht

$$x \cos\alpha - z \sin\alpha \sin\vartheta = 0$$

oder nach Substitution der Werte aus 2b)

$$\begin{aligned} 0 = \xi [\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta] - v \sin\alpha \cos\vartheta [\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta] \\ + \zeta \sin\alpha \sin\vartheta \cos^2\vartheta [\cos\alpha - 1], \end{aligned}$$

woraus nach denselben Regeln wie oben folgt, daß der Winkel μ zwischen dieser Ebene und der Ebene $\xi = 0$, sei

$$\cos\mu = \sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta} .$$

Zur Bestimmung von α und ϑ hat man also die beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} \operatorname{tang}\lambda &= -\operatorname{tang}\alpha \sin\vartheta \\ \cos^2\mu &= \cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta , \end{aligned}$$

woraus folgt

$$\cos\alpha = \cos\mu \cos\lambda$$

$$\sin\vartheta = \mp \frac{\cos\mu \sin\lambda}{\sqrt{1 - \cos^2\mu \cos^2\lambda}}$$

oder

$$\operatorname{tang} \vartheta = \sin \lambda \operatorname{cotang} \mu .$$

Wenn wir diese Werte in 4b) und 4c) setzen, erhalten wir

$$\operatorname{tang} k = -\frac{\sin \mu \sin \lambda}{\cos \mu + \cos \lambda} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4\mathrm{d})$$

$$\operatorname{tang} \frac{k}{2} = -\operatorname{tang}\left(\frac{\mu}{2}\right) \cdot \operatorname{tang}\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

$$\operatorname{tang} k' = \frac{\sin \mu \cos \mu \sin \lambda (1 - \cos \mu \cos \lambda)}{\sin^2 \mu + \cos^3 \mu \sin^2 \lambda \cos \lambda} .$$

Nach einer ähnlichen Methode findet man

$$\operatorname{tang} k = -\frac{\sin m \cos m \sin l (1 - \cos m \cos l)}{\sin^2 m + \cos^3 m \sin^2 l \cos l}$$

$$\operatorname{tang} k' = \frac{\sin m \sin l}{\cos m + \cos l} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4\mathrm{e}).$$

Wann die hier gebrauchten Winkel positiv, wann negativ zu nehmen sind, ist oben festgesetzt worden.

Wenn man statt der Winkel k, μ, λ und k', m, l ihre Hälften in die Gleichungen 4d) und 4e) einführt, bekommen diese die zur logarithmischen Rechnung bequemere Gestalt

$$\operatorname{tang}\left(\frac{k}{2}\right) = -\operatorname{tang}\left(\frac{\mu}{2}\right) \cdot \operatorname{tang}\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4\mathrm{f})$$

$$\operatorname{tang}\left(\frac{k'}{2}\right) = \operatorname{tang}\left(\frac{m}{2}\right) \cdot \operatorname{tang}\left(\frac{l}{2}\right) .$$

Ableitung des Drehungsgesetzes aus dem Prinzipe der leichtesten Orientierung. Wir haben zunächst die Unterschiede der Raddrehung zu berechnen, welche dadurch entstehen, daß die Drehungen um andere Drehungsachsen ausgeführt werden, als um solche, die zur atropen Linie senkrecht sind. Es sei in Fig. 11 ab die Gesichtslinie, ad die Drehungsachse, um welche das Auge gedreht wird, wobei die Gesichtslinie ab den unendlich kleinen Bogen ds senkrecht zur Ebene der Zeichnung zurücklegen möge, so kann die Drehung um ad, deren Winkelgröße wir mit Δ bezeichnen wollen, angesehen werden als resultierend aus einer Drehung um die zu ab senkrechte Achse ac und einer Drehung um ab selbst. Die Größe der letzteren wird sein müssen gleich $\Delta \cos \lambda_1$, wenn wir den Winkel dab, wie in der Figur geschehen ist, mit λ_1 bezeichnen. Nun ist aber die Größe von Δ dadurch bestimmt, daß ab sich um den Bogen ds fortbewegen soll. Für die Bewegung des Punktes b ist hierbei das von b auf die Drehungsachse gefällte Lot bf der Radius Vektor, also

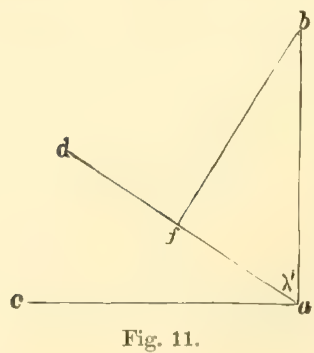


Fig. 11.

$$ab \cdot ds = fb \cdot \varDelta$$

oder

$$ds = \varDelta \sin \lambda_1 .$$

Die Raddrehung um die Linie ab wird also bei dieser Bewegung gleich

$$ds \operatorname{cotang} \lambda'.$$

Denken wir uns nun durch ab Ebenen gelegt nach verschiedenen Richtungen hin, so kann das Element ds in jede dieser Ebenen verlegt werden, und die zugehörigen Drehungsachsen müssen, wenn die Bewegungen des Auges von ab aus kontinuierlich ineinander übergehen sollen, in einer Ebene liegen. Eine der durch ab gelegten Ebenen muß senkrecht stehen auf der Ebene der Drehungsachsen, in welcher ad liegt. Für diese Ebene nehme der Winkel λ_1 den Wert λ an, und es sei ε der Winkel, welchen die durch das Bogenelement ds und die Gesichtslinie ab gelegte Ebene mit jener Ebene des Winkels λ macht. Eine bekannte Formel der sphärischen Trigonometrie ergibt in der rechtwinkeligen dreikantigen Ecke, welche von der Ebene der Drehungsachsen und von den Ebenen der Winkel λ und λ_1 gebildet wird,

$$\operatorname{cotg} \lambda' = \operatorname{cotg} \lambda \cdot \cos \varepsilon$$

und die Drehung um die Linie ab wird also

$$ds \operatorname{cotg} \lambda' = ds \cdot \operatorname{cotg} \lambda \cdot \cos \varepsilon .$$

Wenn nun die Blicklinie ab in der gleichen Stellung den Winkel μ mit der Ebene bildet, die zur atropen Linie normal ist, und $\varkappa$ der Winkel zwischen den beiden durch ab gelegten Ebenen der Winkel μ und λ ist, so würde eine Rechnung ähnlicher Art, wie die eben gemachte, ergeben, daß die Drehung um die Gesichtslinie gleich sein müßte

$$ds \operatorname{cotg} \mu \cos (\varepsilon - \varkappa),$$

wenn die Drehungen den Forderungen des Gesetzes der leichtesten Orientierung überall folgen könnten, wonach die Drehungsachsen stets senkrecht zur atropen Linie bleiben würden.

Das Quadrat des Unterschiedes ϱ zwischen der geforderten und der wirklichen Drehung ist

$$\varrho^2 = ds^2 \{ \operatorname{cotg} \lambda \cos \varepsilon - \operatorname{cotg} \mu \cos (\varepsilon - \varkappa) \}^2 .$$

Die Forderung des Prinzips der leichtesten Orientierung geht also dahin, daß die Summe aller Werte von ϱ^2 für alle unendlich kleinen Bewegungen der Blicklinie von der Ausdehnung ds, welche im Blickfelde möglich sind, ein Minimum sei.

Nehmen wir zuerst die Summe aller Werte von ϱ^2 für Verschiebungen ds, welche von ein und derselben Stellung der Blicklinie nach verschiedenen Richtungen hin, also mit verschiedenen Werten des Winkels ε ausgehen. Wir haben

$$\int_0^{2\pi} \varrho^2 \, d\varepsilon = \pi \, ds^2 \{ \operatorname{cotg}^2 \lambda + \operatorname{cotg}^2 \mu - 2 \operatorname{cotg} \lambda \cdot \operatorname{cotg} \mu \cdot \cos \varkappa \} \quad . \quad . \quad 5).$$

Dieser Ausdruck ist nun weiter zu summieren für alle verschiedenen Stellungen der Blicklinie im Blickfelde, welche gegeben sind durch die Winkel α und ϑ. Also es ist zu bilden das Integral

$$\int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\alpha \int_0^{2\pi} d\varepsilon \cdot \varrho^2 \sin\alpha = R \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5a),$$

worin α_0 die Werte bezeichnet, welche der Grenze des Blickfeldes entsprechen.

Um diese Integration auszuführen, müssen die Werte von λ und $\varkappa$ gefunden werden, welche den einzelnen Werten von α und ϑ entsprechen. Zu diesem Ende differenziere man die Gleichungen 1c) nach α und ϑ, indem man den Winkel ω als Funktion der beiden ersteren Winkel ansieht, und ξ, v, ζ als Konstanten. Für die Punkte der Drehungsachse muß

$$dx = dy = dz = 0$$

werden. Dann bilde man hieraus die ebenfalls für die Punkte der Drehungsachse geltenden Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} a\,dx + a_{,}\,dy + a_{,,}\,dz &= 0 \\ b\,dx + b_{,}\,dy + b_{,,}\,dz &= 0 \\ c\,dx + c_{,}\,dy + c_{,,}\,dz &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6),$$

wo die Größen a, b, c usw. die Koeffizienten der Gleichungen 1c) bezeichnen

$$\begin{aligned} a &= \cos\alpha \\ a_{,} &= \sin\alpha\cos\vartheta \\ a_{,,} &= -\sin\alpha\sin\vartheta \\ b &= -\cos\omega\sin\alpha \\ b_{,} &= \cos\alpha\cos\vartheta\cos\omega - \sin\vartheta\sin\omega \\ b_{,,} &= -\cos\alpha\sin\vartheta\cos\omega - \cos\vartheta\sin\omega \\ c &= -\sin\omega\sin\alpha \\ c_{,} &= \cos\alpha\cos\vartheta\sin\omega + \sin\vartheta\cos\omega \\ c_{,,} &= -\cos\alpha\sin\vartheta\sin\omega + \cos\vartheta\cos\omega . \end{aligned}$$

Zwischen diesen Größen finden bekanntlich Systeme von Gleichungen folgender Art statt

$$\left.\begin{aligned} 1 &= a^2 + a_{,}^2 + a_{,,}^2 & ab + a_{,}b_{,} + a_{,,}b_{,,} &= 0 \\ 1 &= b^2 + b_{,}^2 + b_{,,}^2 & ac + a_{,}c_{,} + a_{,,}c_{,,} &= 0 \\ 1 &= c^2 + c_{,}^2 + c_{,,}^2 & bc + b_{,}c_{,} + b_{,,}c_{,,} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad A)$$

$$\left.\begin{aligned} 0 &= a\,da + a_{,}da_{,} + a_{,,}da_{,,} \\ &\quad a\,db + a_{,}db_{,} + a_{,,}db_{,,} = -(b\,da + b_{,}da_{,} + b_{,,}da_{,,}) \\ 0 &= b\,db + b_{,}db_{,} + b_{,,}db_{,,} \\ &\quad a\,dc + a_{,}dc_{,} + a_{,,}dc_{,,} = -(c\,da + c_{,}da_{,} + c_{,,}da_{,,}) \\ 0 &= c\,dc + c_{,}dc_{,} + c_{,,}dc_{,,} \\ &\quad b\,dc + b_{,}dc_{,} + b_{,,}dc_{,,} = -(c\,db + c_{,}db_{,} + c_{,,}db_{,,}) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad B)$$

Setzt man nun in den Gleichungen 6) statt dx, dy, dz ihre Werte

$$\begin{aligned} dx &= \xi\,da + v\,db + \zeta\,dc \\ dy &= \xi\,da_{,} + v\,db_{,} + \zeta\,dc_{,} \\ dz &= \xi\,da_{,,} + v\,db_{,,} + \zeta\,dc_{,,} , \end{aligned}$$

so erhält man

$$\left.\begin{aligned}0 &= v(a\,db + a_{,}db_{,} + a_{,,}db_{,,}) + \zeta(a\,dc + a_{,}dc_{,} + a_{,,}dc_{,,})\\ 0 &= \xi(b\,da + b_{,}da_{,} + b_{,,}da_{,,}) + \zeta(b\,dc + b_{,}dc_{,} + b_{,,}dc_{,,})\\ 0 &= \xi(c\,da + c_{,}da_{,} + c_{,,}da_{,,}) + v(c\,db + c_{,}db_{,} + c_{,,}db_{,,})\end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad 6\text{a}).^{*}$$

Diese letzteren drei Gleichungen[1] geben jede der Koordinaten der Drehungsachse durch jede andere ausgedrückt.

Für eine zur Ebene der Drehungsachsen normale Linie sei $\frac{\pi}{2} - \lambda$ der Winkel, den sie mit der ξ-Achse (Blicklinie) bildet, und $\varkappa$ der Winkel, den die Ebene des Winkels λ mit der Ebene der $v\xi$ macht, entsprechend der Bezeichnung in Gleichung 5) und unter der Annahme, daß die Ebene der $v\xi$ durch die atrope Linie gelegt sei, dann ist für die Ebene der Drehungsachsen

$$\xi \sin\lambda + v\cos\lambda\cos\varkappa + \zeta\sin\lambda\sin\varkappa = 0$$

oder wenn man die Werte von v und ζ aus den beiden letzten Gleichungen 6a) nimmt und mit

$$(b\,dc + b_{,}dc_{,} + b_{,,}dc_{,,}) = -(c\,db + c_{,}db_{,} = c_{,,}db_{,,})$$

multipliziert, so erhält man

$$\left.\begin{aligned}0 = \sin\lambda(b\,dc + b_{,}dc_{,} + b_{,,}dc_{,,}) - \cos\lambda\cos\varkappa\,(c\,da + c_{,}da_{,} + c_{,,}da_{,,})\\ + \cos\lambda\sin\varkappa\,(b\,da + b_{,}da_{,} + b_{,,}da_{,,})\end{aligned}\right\} \quad . \quad 6\text{b}).$$

Diese Gleichung zerfällt nun in zwei, wenn $d\alpha$ und $d\vartheta$ unabhängig voneinander sind, da jedes der Differentiale die Form hat

$$da = \frac{da}{d\alpha}d\alpha + \frac{da}{d\vartheta}d\vartheta.$$

Werden also die Differentiale in 6b) ausgeführt, und erst nach α genommen, und dann nach ϑ, so erhält man folgende zwei Gleichungen:

$$0 = \sin\lambda\frac{d\omega}{d\alpha} - \cos\lambda\cos\varkappa\sin\omega + \cos\lambda\sin\varkappa\cos\omega$$

$$0 = \sin\lambda\left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right) + \cos\lambda\cos\varkappa\sin\alpha\cos\omega + \cos\lambda\sin\varkappa\sin\alpha\sin\omega.$$

---

[1] Es ist leicht zu sehen bei Berücksichtigung der Gleichungen B), daß die dritte dieser Gleichungen identisch aus den beiden ersten folgt. Wenn nun das ω der Gleichungen 1c) eine kontinuierliche Funktion von α und ϑ ist, also

$$d\omega = \frac{d\omega}{d\alpha}d\alpha + \frac{d\omega}{d\vartheta}d\vartheta,$$

so werden die Differentiale da, db, dc usw. alle von der Form

$$d\alpha = \frac{da}{d\alpha}d\alpha + \frac{da}{d\vartheta}d\vartheta.$$

Eliminiert man nun aus zweien der Gleichungen 6a) das Verhältnis $\frac{d\alpha}{d\vartheta}$, so behält man eine durch ζ teilbare, und nach der Division in bezug auf ξ, v, ζ lineare Gleichung zurück, die Gleichung einer Ebene, in der alle Drehungsachsen für unendlich kleine Drehungen aus der gegebenen Stellung des Auges liegen müssen. Darin liegt der Beweis des früher angeführten Hilfssatzes, daß bei kontinuierlichen Bewegungen des Auges und unendlich kleinen Drehungen jeder Stellung eine Ebene der Drehungsachsen zukommt.

---

* Die Ableitung dieser Gleichungen hat Helmholtz in der Sammlung seiner wissenschaftlichen Abhandlungen (Leipzig 1883) in etwas anderer Weise gegeben. K.

Durch Elimination von $\cos \varkappa$ oder $\sin \varkappa$ erhält man aus den beiden letzten Gleichungen:

$$\sin \lambda \left(\sin \alpha \sin \omega \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} - \cos \omega \frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} - \cos \omega \cos \alpha\right) = \cos \lambda \cos \varkappa \sin \alpha$$

$$\sin \lambda \left(\sin \alpha \cos \omega \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} + \sin \omega \frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \sin \omega \cos \alpha\right) = - \cos \lambda \sin \varkappa \sin \alpha\,.$$

Dividieren wir beide Gleichungen durch $\sin \lambda \ \sin \alpha$, so gibt die erstere den Wert von $\operatorname{cotg} \lambda \ \cos \varkappa$, den wir zur Substitution in 5) brauchen, und beide quadriert und addiert, geben:

$$\operatorname{cotg}^2 \lambda = \left(\frac{d\,\omega}{d\,\alpha}\right)^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}\left(\frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \cos \alpha\right)^2$$

und wir erhalten endlich den Wert von dem Integral R, welches ein Minimum werden soll

$$\left.\begin{aligned} R = \pi\, d s^2 \int_0^{2\pi} d\,\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\,\alpha \Bigg\{ \sin \alpha \left(\frac{d\,\omega}{d\,\alpha}\right)^2 \\ + \frac{1}{\sin \alpha}\left(\frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \cos \alpha\right)^2 - 2 \operatorname{cotg} \mu \left[\sin \alpha \sin \omega \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} - \cos \omega \left(\frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \cos \alpha\right)\right] \\ + \operatorname{cotg}^2 \mu \sin \alpha \Bigg\} \end{aligned}\right\} \quad 6\text{c}).$$

Veränderlich ist in diesem Ausdrucke ω und μ. Damit R ein Minimum werde, sind die Variationen nach beiden Größen gleich Null zu setzen. Also

$$\left.\begin{aligned} 0 = \int_0^{2\pi} d\,\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\,\alpha \Bigg\{ \sin \alpha \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} \cdot \frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\alpha} + \frac{1}{\sin \alpha}\left(\frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \cos \alpha\right) \frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\vartheta} \\ - \operatorname{cotg} \mu \left[\left[\sin \alpha \cos \omega \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} + \sin \omega \left(\frac{d\,\omega}{d\,\alpha} + \cos \alpha\right)\right] d\,\omega \right. \\ \left. + \sin \alpha \sin \omega \frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\alpha} - \cos \omega \frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\vartheta}\right]\Bigg\} \end{aligned}\right\} \quad . \ . \ 6\text{d})$$

und

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{cotg} \mu \int_0^{2\pi} d\,\vartheta \int_0^{\alpha_0} \sin \alpha\, d\,\alpha \\ = \int_0^{2\pi} d\,\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\,\alpha \left[\sin \alpha \sin \omega \frac{d\,\omega}{d\,\alpha} - \cos \omega \left(\frac{d\,\omega}{d\,\vartheta} + \cos \alpha\right)\right] \end{aligned}\right\} \quad . \ . \ 6\text{e}).$$

Aus der Gleichung 6 d) kann man durch partielle Integration die Größen $\frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\alpha}$ und $\frac{d\,\delta\,\omega}{d\,\vartheta}$ entfernen, und erhält dann zwei Integrale, eines nach dem Umfange Blickfeldes, eines über seine Fläche ausgedehnt, die nur noch $\delta\,\omega$ als Faktor

unter dem Integrationszeichen enthalten. Ehe man dies aber ausführt, ist danach zu sehen, daß die zu integrierende Funktion nicht mehrdeutig oder diskontinuierlich werde im Innern des Blickfeldes. Nun ist schon oben bemerkt worden, daß für sehr kleine Werte von α rings um die Anfangsstellung des Auges die Größe $\omega + \vartheta$ gleich Null sein muß. Nun wächst aber ϑ von 0 bis 2π, wenn man die Blicklinie einmal um die Anfangsstellung einen unendlich kleinen Kreis beschreiben läßt, also muß dabei ω von 0 bis -2π sich verändern, und in der Nähe der Anfangsstellung diskontinuierlich sein. Es ist deshalb besser eine andere Variable

$$\eta = \omega + \vartheta$$

einzuführen, welche überall im Blickfelde kontinuierlich sein kann. Dann ist

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{d\eta}{d\alpha} \quad \text{und} \quad \frac{d\omega}{d\vartheta} = \frac{d\eta}{d\vartheta} - 1$$

$$\delta\omega = \delta\eta .$$

Wenn wir nach dieser Substitution die partielle Integration der Gleichung 6d) ausführen, um $\frac{d\delta\eta}{d\alpha}$ und $\frac{d\delta\eta}{d\vartheta}$ wegzuschaffen, so haben wir nachher den Prinzipien der Variationsrechnung gemäß in beiden Integralen, dem nach den Umfange sowohl, wie in dem nach der Fläche, die Faktoren gleich Null zu setzen, welche mit $\delta\eta$ multipliziert sind, und erhalten

1. für den Umfang, indem wir ihn in Richtung der wachsenden ϑ durchlaufen denken:

$$\left.\begin{aligned} 0 = \sin\alpha \frac{d\eta}{d\alpha}\, d\vartheta - \left(\frac{d\eta}{d\vartheta} - 1 + \cos\alpha\right) \frac{d\alpha}{\sin\alpha} \\ - \operatorname{cotg}\mu \left[\sin\alpha \cdot \sin(\eta - \vartheta)\, d\vartheta + \cos(\eta - \vartheta)\, d\alpha\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 7),$$

2. für die Fläche des Blickfeldes

$$0 = \frac{d}{d\alpha}\left(\sin\alpha \frac{d\eta}{d\alpha}\right) + \frac{1}{\sin\alpha}\frac{d^2\eta}{d\vartheta^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7\text{a}),$$

wozu endlich noch kommt die Gleichung 6e), welche ebenfalls eine einmalige Integration zuläßt

$$\operatorname{cotg}\mu \int_0^{2\pi} (1 - \cos\alpha)\, d\vartheta = \int [-\sin\alpha \cos(\eta - \vartheta)\, d\vartheta + \sin(\eta - \vartheta)\, d\alpha] \quad . \quad 7\text{b}),$$

welche beide Integrale über den ganzen Umfang zu nehmen sind. Das Integral links, welches mit $\operatorname{cotg}\mu$ multipliziert ist, ist bekanntlich der Flächeninhalt des Blickfeldes. Um diese Gleichungen zu vereinfachen, führen wir statt α eine andere Variable ein, nämlich

$$\beta = \text{log. nat. tang}\,\frac{\alpha}{2},$$

so daß wird

$$e^\beta = \text{tang}\,\frac{\alpha}{2} \qquad \frac{2e^\beta}{1 + e^{2\beta}} = \sin\alpha$$

$$d\beta = \frac{d\alpha}{\sin\alpha} \qquad \frac{1 - e^{2\beta}}{1 + e^{2\beta}} = \cos\alpha$$

und wenn ψ eine beliebige Funktion von α ist, so ist

$$\frac{d\psi}{d\beta} = \frac{d\psi}{d\alpha}\sin\alpha\,.$$

Substituiert man diese Werte in 7a), so erhält man folgende Gleichung für das Innere des Feldes

$$\frac{d^2\eta}{d\beta^2} + \frac{d^2\eta}{d\vartheta^2} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7\text{c}),$$

dann aus 7) für den Umfang

$$\left.\begin{aligned} 0 = \frac{d\eta}{d\beta}d\vartheta - \left(\frac{d\eta}{d\vartheta} - \frac{2e^{2\beta}}{1+e^{2\beta}}\right)d\beta \\ - \operatorname{cotg}\mu\cdot\frac{2e^{\beta}}{1+e^{2\beta}}\Big[\sin(\eta-\vartheta)\,d\vartheta \\ + \cos(\eta-\vartheta)\,d\beta\Big] \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 7\text{d})$$

und endlich aus 7b)

$$\operatorname{cotg}\mu\int\frac{2e^{2\beta}}{1+e^{2\beta}}\,d\vartheta = \int\frac{2e^{\beta}}{1+e^{2\beta}}\Big[\sin(\eta-\vartheta)\,d\beta - \cos(\eta-\vartheta)\,d\vartheta\Big] \quad \ldots \quad 7\text{e}).$$

Es ist bekannt, daß alle reellen Integrale der Gleichung 7c) dargestellt werden können als der reelle Teil irgendeiner beliebigen Funktion ψ von der komplexen Größe $\beta + \vartheta i$. Wenn gesetzt wird

$$\psi = \varphi + \chi i \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8),$$

wo φ und χ reell sind, so kann sowohl φ als χ Integral der Gleichung 7c) sein.

Soll φ ein für unsere Zwecke passendes Integral sein, so muß es erstens innerhalb des Blickfeldes überall endlich und eindeutig sein, auch für $\alpha = 0$ oder $\beta = -\infty$. Zweitens muß es auch noch längs des Randes des Blickfeldes den Gleichungen 7d) und 7e) genügen.

Aus der Gleichung 8) folgt, wenn wir das Differential von ψ nach der komplexen Variablen $\beta + \vartheta i$ mit ψ' bezeichnen

$$\frac{d\psi}{d\beta} = \psi' = \frac{d\varphi}{d\beta} + i\frac{d\chi}{d\beta}$$

$$\frac{d\psi}{d\vartheta} = i\psi' = \frac{d\varphi}{d\vartheta} + i\frac{d\chi}{d\vartheta},$$

also wenn man ψ' eliminiert,

$$0 = i\frac{d\varphi}{d\beta} - \frac{d\chi}{d\beta} - \frac{d\varphi}{d\vartheta} - i\frac{d\chi}{d\vartheta}$$

oder

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\chi}{d\beta} + \frac{d\varphi}{d\vartheta} = 0 \\ \frac{d\chi}{d\vartheta} - \frac{d\varphi}{d\beta} = 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8\text{a}).$$

Setzt man ferner

$$Y = Y_0 + i\,Y_1 = e^{\chi - \varphi i + \beta + \vartheta i},$$

so ist auch diese Größe eine Funktion von $\beta + \vartheta i$, und folglich

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\,Y_0}{d\,\vartheta} + \frac{d\,Y_1}{d\,\beta} = 0 \\ \frac{d\,Y_0}{d\,\beta} - \frac{d\,Y_1}{d\,\vartheta} = 0 \end{aligned}\right| \quad \dots\dots\dots \quad 8\text{b})$$

und

$$\left.\begin{aligned} Y_0 &= e^{\chi} e^{\beta} \cos(\varphi - \vartheta) \\ Y_1 &= -e^{\chi} e^{\beta} \sin(\varphi - \vartheta) \end{aligned}\right| \quad \dots\dots\dots \quad 8\text{c}).$$

Wenn wir nun in Gleichung 7d) die Größe φ für η substituieren, und die Gleichung multiplizieren mit dem Faktor

$$e^{\sigma} = e^{\chi}(1 + e^{2\beta}),$$

wobei wir setzen

$$\sigma = \chi + \log.\text{nat.}(1 + e^{2\beta}),$$

so erhalten wir mit Berücksichtigung der Gleichungen 8a) und 8c)

$$0 = e^{\sigma}\frac{d\,\sigma}{d\,\vartheta}\,d\,\vartheta + e^{\sigma}\frac{d\,\sigma}{d\,\beta}\,d\,\beta + 2\,\text{cotg}\,\mu\left[Y_1\,d\,\vartheta - Y_0\,d\,\beta\right] \quad \dots \quad 8\text{d}).$$

Diese Gleichung ist ein vollständiges Differential, da nach 8b)

$$\frac{d\,Y_1}{d\,\beta} = \frac{d}{d\,\vartheta}\left(-Y_0\right).$$

In der Tat, wenn wir die Funktion Y nach der komplexen Variablen $\beta + \vartheta i$ integrieren, und das Integral ist

$$\Phi = \Phi_0 + i\,\Phi_1,$$

so haben wir

$$\Phi' = Y$$

oder

$$\frac{d\,\Phi_0}{d\,\beta} + i\,\frac{d\,\Phi_1}{d\,\beta} = Y_0 + i\,Y_1$$

$$\frac{d\,\Phi_0}{d\,\vartheta} + i\,\frac{d\,\Phi_1}{d\,\vartheta} = i\,Y_0 - Y_1,$$

also

$$Y_0 = \frac{d\,\Phi_0}{d\,\beta} = \frac{d\,\Phi_1}{d\,\vartheta}$$

$$Y_1 = \frac{d\,\Phi_1}{d\,\beta} = -\frac{d\,\Phi_0}{d\,\vartheta}.$$

Die Gleichung 8d) integriert, gibt also für den Umfang des Feldes

$$C = e^{\sigma} - 2\,\text{cotg}\,\mu \cdot \Phi_0 \quad \dots\dots\dots \quad 8\text{c})$$

oder

$$\sigma = \chi + \log.\text{nat.}(1 + e^{2\beta}) = \log.\text{nat.}\left[C + 2\,\text{cotg}\,\mu \cdot \Phi_0\right] \quad \dots \quad 8\text{f}).$$

Die Konstanten C und μ müssen aber auch schließlich der Gleichung 7e) genügen, wenn μ derjenige Winkel sein soll, welcher den Forderungen des Prinzips der leichtesten Orientierung am besten entspricht.

Nun läßt sich zeigen, daß der Wert $\operatorname{cotg} \mu = 0$ der Gleichung 8f) und 7e) zugleich entspricht. Denn es ist das über den ganzen Umfang des Feldes genommene Integral

$$\int Y_0\, d\vartheta + Y_1\, d\beta = \int \frac{d\,\Phi_1}{d\,\vartheta}\, d\vartheta + \frac{d\,\Phi_1}{d\,\beta}\, d\beta = 0,$$

wenn, wie aus der über φ gemachten Annahme folgt, auch Φ_1 überall endlich und eindeutig ist, weil dies Integral gleich der Differenz der Werte von Φ_1 ist, die diese Größe in demselben Punkte der Peripherie vor und nach einem Umlauf um deren ganze Länge annimmt. Setzen wir statt der Größen Y_0 und Y_1 ihre Werte aus 8c), so haben wir

$$0 = \int \frac{e^{\sigma} \cdot e^{\beta}}{1 + e^{2\beta}} \left[\cos(\varphi - \vartheta)\, d\vartheta - \sin(\varphi - \vartheta)\, d\beta\right].$$

Wenn nun $\operatorname{cotg} \mu = 0$ gesetzt wird, so folgt aus 8f), daß die Größe σ längs des ganzen Umfanges konstant wird, und daher der Faktor e^{σ} vor das Integrationszeichen gesetzt werden kann, und daß wir unter der Voraussetzung $\operatorname{cotg} \mu = 0$ haben

$$0 = \int \frac{e^{\beta}}{1 + e^{2\beta}} \left[\cos(\varphi - \vartheta)\, d\vartheta - \sin(\varphi - \vartheta)\, d\beta\right],$$

woraus folgt, daß die Gleichung 7e) unter der gemachten Annahme erfüllt ist.

Die Frage, ob noch andere Werte als der $\operatorname{cotg} \mu = 0$ den Bedingungen der Aufgabe genügen würden, läßt sich, soviel ich sehe, noch nicht für eine jede beliebig gegebene Form des Blickfeldes lösen. Da aber das wirkliche Blickfeld der Kreisform ziemlich nahe kommt, so wird es hier genügen, wenn ich noch den Beweis führe, daß für die Kreisform kein anderer reeller Wert existiert, als $\mu = 0$.

Das Drehungsgesetz für ein kreisförmiges Blickfeld. Da die zu suchende Funktion η der reelle Teil einer beliebigen Funktion von $\beta + \vartheta i$ sein soll, welche für keinen Punkt des Blickfeldes unendlich oder mehrdeutig wird, auch nicht für $\beta = -\infty$, so wird sie im allgemeinen von der Form sein müssen

$$\left.\begin{aligned} \eta = A_0 + A_1 e^{\beta} \cos(\vartheta + c_1) + A_2 e^{2\beta} \cos(2\vartheta + c_2) \\ + A_3 e^{3\beta} \cos(3\vartheta + c_3) + \text{usw.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 9),$$

wo die Größen A und c beliebige willkürliche Konstanten bezeichnen. Das zugehörige χ wird dann sein

$$\left.\begin{aligned} \chi = A_1 e^{\beta} \sin(\vartheta + c_1) + A_2 e^{2\beta} \sin(2\vartheta + c_2) \\ + A_3 e^{3\beta} \sin(3\vartheta + c_3) + \text{usw.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 9\text{a})$$

und wenn $\operatorname{cotg} \mu = 0$ ist, so wird die Gleichung der Umfangslinie:

$$\chi = \text{log. nat.} \frac{C}{1 + e^{2\beta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{b}).$$

Die in allen diesen Gleichungen vorkommende Größe e^{β} ist gleich $\operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}$. Kann man also die Gleichung zwischen α und ϑ, welche die Linie des Umfangs bestimmt, in die Form 9b) bringen, so ist dadurch die Aufgabe gelöst, indem

man von χ aus immer leicht den Winkel η finden kann, der die Abweichung vom LISTINGschen Gesetze mißt.

Wir wollen jetzt untersuchen, welche Gestalt das Feld annimmt unter der Annahme, daß η konstant sei, oder da die absolute Größe des ihm beigelegten Wertes ganz gleichgültig ist, wenn

$$\eta = 0 \quad \dots\dots\dots\dots \quad 10).$$

Dagegen wollen wir den Wert von $\operatorname{cotg} \mu$ unbestimmt lassen.

Aus der Annahme 10) folgt, daß auch $\chi = 0$ sei, und die Größen Y der Gleichungen 8c) werden

$$Y_0 = e^\beta \cos \vartheta$$
$$Y_1 = e^\beta \sin \vartheta$$
$$Y_0 + Y_1 i = e^{\beta + \vartheta i} = \Phi_0 + \Phi_1 i.$$

Die Gleichung des Umfangs 8f) wird also

$$1 + e^{2\beta} = C + 2 e^\beta \cos \vartheta \cdot \operatorname{cotg} \mu.$$

Setzen wir statt e^β seinen Wert $\operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}$, so läßt sich diese Gleichung schreiben

$$\operatorname{tang} \frac{\alpha}{2} + (1 - C) \operatorname{cotg} \frac{\alpha}{2} = 2 \cos \vartheta \cdot \operatorname{cotg} \mu \quad \dots\dots \quad 10\text{a}).$$

Dies ist die Gleichung eines Kreises. Denn in untenstehendem sphärischen Dreiecke der Fig. 12 ist nach einer bekannten Formel

$$\cos \varrho = \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \cdot \cos \vartheta$$

oder wenn wir darin $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ durch $\operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}$ ausdrücken:

$$\cos \varrho \left(1 + \operatorname{tang}^2 \frac{\alpha}{2}\right) = \cos \gamma \left(1 - \operatorname{tang}^2 \frac{\alpha}{2}\right) + 2 \operatorname{tang} - \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \gamma \cos \vartheta$$

oder

$$(\cos \varrho + \cos \gamma) \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2} + (\cos \varrho - \cos \gamma) \operatorname{cotg} \frac{\alpha}{2} = 2 \sin \gamma \cos \vartheta \quad \dots \quad 10\text{b}).$$

Setzen wir also

$$\frac{\cos \varrho - \cos \gamma}{\cos \varrho + \cos \gamma} = 1 - C \quad \text{und} \quad \frac{\sin \gamma}{\cos \varrho + \cos \gamma} = \operatorname{cotg} \mu \quad \dots \quad 10\text{c}),$$

so ist die Gleichung 10b) mit 10a) identisch, und aus den beiden letzten Gleichungen ergibt sich ein konstanter Wert für ϱ, welches den Bogenabstand längs der Kugelfläche für den Punkt B am Umfange des Blickfeldes von dem Punkte A bezeichnet. Der Umfang des Blickfeldes ist also, wenn $\eta = 0$, ein Kreis, dessen Bogenradius ϱ und dessen Mittelpunkt A ist.

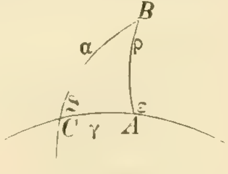


Fig. 12.

Die zweite Gleichung des Umfangs können wir in der Form 7b) benutzen. Das eben dort links stehende Integral ist, wie schon oben bemerkt wurde, und wie seine Form in 6e) am leichtesten erkennen läßt, der Flächeninhalt des Blickfeldes, der jetzt durch ϱ auszudrücken ist, so daß wir haben

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu \cdot (1 - \cos \varrho) = -\int \sin \alpha \cos \vartheta \, d\vartheta + \sin \vartheta \, d\alpha \quad . \quad . \quad . \quad 10\text{d}).$$

Wenn wir nun für das sphärische Dreieck der Fig. 12 die bekannten Formeln der sphärischen Trigonometrie

$$\cos \alpha = \cos \gamma \cos \varrho - \sin \gamma \sin \varrho \cos \varepsilon$$

$$\sin \vartheta \sin \alpha = \sin \varrho \sin \varepsilon$$

anwenden, und beide nach α und ϑ differentiieren, wobei ϱ als konstant für den Umfang des Blickfeldes anzusehen ist; so haben wir längs dieses Umfanges

$$\cos \vartheta \sin \alpha \, d\vartheta + \sin \vartheta \cos \alpha \, d\alpha = \sin \varrho \cos \varepsilon \, d\varepsilon$$

$$\sin \alpha \, d\alpha = -\sin \gamma \sin \varrho \sin \varepsilon \, d\varepsilon$$

oder

$$\sin \vartheta \, d\alpha = -\frac{\sin \gamma \sin^2 \varrho \sin^2 \varepsilon \, d\varepsilon}{\sin^2 \alpha}.$$

Diese Werte, in das Integral der Gleichung 10d) gesetzt, ergeben:

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu (1 - \cos \varrho)$$

$$= -\int_0^{2\pi} \frac{\sin \varrho \cos \varepsilon + \cos \gamma \cos \varrho \sin \varrho \cos \varepsilon - \sin \gamma \sin^2 \varrho}{1 + \cos \varrho \cos \gamma - \sin \gamma \sin \varrho \cos \varepsilon} \, d\varepsilon.$$

Setzen wir hierin zur Abkürzung

$$1 + \cos \gamma \cos \varrho = a$$

$$\sin \gamma \sin \varrho = b$$

$$\operatorname{tang} \frac{\varepsilon}{2} = x,$$

so können wir das Integral auf die Form bringen

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu (1 - \cos \varrho)$$

$$= -\sin \varrho \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{a+b}{b} \frac{dx}{1 + \frac{a+b}{a-b} x^2} + \frac{a \sin \varrho}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{1 + x^2}$$

$$= \frac{\pi \sin \varrho}{b} (a - \sqrt{a^2 - b^2}).$$

Drücken wir $\operatorname{cotg} \mu$, a und b wieder durch γ und ϱ aus, so erhalten wir

$$\frac{2 \sin \gamma (1 - \cos \varrho)}{\cos \varrho + \cos \gamma} = \frac{1}{\sin \gamma} (1 + \cos \gamma \cos \varrho - \cos \gamma - \cos \varrho)$$

oder

$$2 \sin^2 \gamma (1 - \cos \varrho) = (\cos \varrho + \cos \gamma) [1 + \cos \gamma \cos \varrho - \cos \gamma - \cos \varrho] \quad . \quad 10\text{e}),$$

wofür auch geschrieben werden kann:

$$(1 - \cos \gamma)(1 - \cos \varrho) \{2 + \cos \gamma - \cos \varrho\} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10\text{f}),$$

woraus folgt, daß der einzige reelle Wert von $\cos \gamma$, der diese Gleichung zu Null macht, ist

$$\cos \gamma = 1,$$

woraus folgt

$$\sin\gamma = 0 \quad \text{und} \quad \operatorname{cotg}\mu = 0\,.$$

Der zweite Wert von $\cos\gamma$, den die Gleichung 10f) gibt, würde kleiner als -1 sein, nämlich

$$\cos\gamma = \cos\varrho - 2$$

und also einem imaginären Bogen entsprechen.

Die vorliegende Rechnung[1] ist durchgeführt worden unter der Voraussetzung, daß Bewegungen des Auges in allen Teilen des Blickfeldes und nach allen Richtungen gleich häufig vorkommen, was der Wirklichkeit wohl nicht ganz entspricht, indem wir in der Regel die Blicklinie in den mittleren Teilen ihres Bewegungsfeldes zu halten pflegen. Die peripherischen Teile des Feldes werden deshalb im allgemeinen weniger durchlaufen als die zentralen, und werden deshalb auch einen geringeren Einfluß auf das Bewegungsgesetz haben müssen als die zentralen. Diesen Umstand in der Rechnung zu berücksichtigen schien mir nutzlos, da wir seine Größe doch nicht genau kennen, und da sich leicht übersehen läßt, welchen Einfluß er auf das Resultat haben wird. Aus der Gleichung 9), welche wir schreiben können

$$\eta = A_0 + A_1 \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\cos(\vartheta + c_1) + A_2 \operatorname{tang}^2\frac{\alpha}{2}\cdot\cos(2\vartheta + c_2)$$
$$+ A_3 \operatorname{tang}^3\frac{\alpha}{2}\cos(3\vartheta + c_3) \text{ usw.}$$

und in der wir den Anfangspunkt der Koordinaten noch so verändern können, daß das mit der ersten Potenz von $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ behaftete Glied gleich Null wird, geht hervor, daß für kleine Werte von α, η nahehin konstant ist, und daß nur nach der Peripherie des Feldes hin, wo die Werte von $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ größer werden, die Abweichungen vom LISTINGschen Gesetze merklich werden können. Wenn nun die peripherischen Teile des Blickfeldes überhaupt weniger Einfluß erhalten, so wird eben die Abweichung vom LISTINGschen Gesetze, welche durch eine nicht kreisförmige Form des Feldes bedingt werden könnte, noch geringer werden müssen, als wenn die peripherischen Teile oft durchlaufen werden.

Außerdem möchte es vielleicht nicht ganz richtig sein, daß in allen Teilen des Gesichtsfeldes Bewegungen des Blicks nach allen Richtungen hin gleich häufig sind. Wenigstens finde ich an mir selbst, daß ich Bewegungen, die der Peripherie des Blickfeldes parallel gehen, zu vermeiden suche, namentlich, wenn ich die Form und Ausdehnung der betreffenden Objekte deutlich zu erkennen wünsche. Ich habe dann den unwillkürlich wirkenden Trieb den Kopf so zu drehen, daß die betreffenden Bewegungen des Blicks in Meridiane des Blickfeldes fallen, die durch die Primärlage gehen. So kann ich an einer gerade vor mir liegenden Vertikallinie mit dem Blicke hoch hinauflaufen ohne die

[1] Sie ist hier weiter durchgeführt worden, als dies bei der ersten Veröffentlichung dieser Untersuchungen im Archiv für Ophthalmologie IX, 2, geschehen war. Dort war der Winkel μ zwischen der Blicklinie und der atropen Linie noch als fest gegeben betrachtet worden, und außerdem als klein. Es ist mir erst später gelungen, den Beweis zu finden, daß die Konsequenzen des zugrunde gelegten Prinzips fordern, daß er gleich Null sei.

Neigung den Kopf zu drehen; wenn ich aber an einer hoch gelegenen Horizontallinie entlang laufen will, so ist es mir natürlicher, den Kopf zu heben, bis ich sie in der Primärlage habe, als es mit gehobenen Augen zu tun.

Es scheinen mir also die Bewegungen des Auges bevorzugt zu sein, welche in Meridianen des Blickfeldes entlang laufen, die durch die Primärlage gehen. Dies sind auch die Bewegungen, bei denen keine Scheindrehung der Objekte stattfindet, und daher rührt auch wohl ihre Bevorzugung. Auch dieser Umstand muß dahin wirken, daß wenn einmal das LISTINGsche Gesetz für die Bewegung eines individuellen Auges zur Geltung gekommen ist, die Neigung von dem Gesetze abzuweichen, wegen irgendwelcher Unregelmäßigkeiten des Blickfeldes geringer werden muß.

Herr E. HERING[1] hat noch hervorgehoben, daß das Auge wegen der Konvergenz auf nahe Gegenstände relativ häufiger nach innen gerichtet ist, als nach außen. Da wir nun aber, wie VOLKMANN experimentell gezeigt, und wir oben theoretisch zu begründen gesucht haben, die Parallelstellungen der Augen in bezug auf das Bewegungsgesetz wenigstens kurzsichtiger Augen trennen müssen und trennen dürfen von den Konvergenzstellungen, so fällt jener Umstand für das Gesetz der Raddrehung in Parallelstellungen außer Betracht.

Dagegen ist allerdings zu beachten, daß wir Parallelstellungen hauptsächlich für die oberen Teile des Blickfeldes anwenden, weil mit seltenen Ausnahmen nur dort unendlich entfernte Gegenstände vorkommen, während wir im Gegenteil Konvergenzstellungen fast nur für die unteren Teile des Feldes benutzen, wo der Fußboden, unsere Hände und die Objekte, die wir in den Händen haben, sich befinden. Wenn man versucht, zwei Punkte, die in der Distanz der Augen auf einem Blatt Papier gezeichnet sind, mit parallelen Gesichtslinien zu betrachten und dadurch zum Decken zu bringen, so ist dies viel schwerer bei gesenkter Visierebene, als bei gehobener, und umgekehrt ist das Konvergieren auf einen nahen Punkt viel schwerer bei gehobener Visierebene, als bei gesenkter, und wir dürfen deshalb wohl erwarten, daß im allgemeinen bei Konvergenzstellungen der Augen die Abweichungen der Raddrehung von der der Parallelstellungen in dem Sinne geschehen werden, als ob die Primärlage der konvergenten Augen nach innen und unten von der Primärlage der parallelen läge. Damit scheinen auch die bisher ausgeführten Beobachtungen übereinzustimmen.

Übrigens halte ich es für wahrscheinlich, daß auch mancherlei Abweichungen durch angewöhnte Manieren in der Bewegung der Augen eintreten können, wie das bei einem Gesetze, welches wesentlich nur durch Einübung entstanden ist und durch Willkür gebrochen werden kann, natürlich ist. Einen beträchtlichen Einfluß scheint auch die Kurzsichtigkeit zu haben, teils wohl wegen der vorzugsweise gebrauchten Konvergenzstellungen, teils wegen der Difformität des Augapfels, welche mechanische Schwierigkeiten hervorbringen kann. Ja selbst die Gewöhnung an Brillengläser, die vielleicht nicht ganz zentriert vor dem Auge stehen, kann Einfluß haben.

Ich will mir erlauben hier schließlich noch auf eine Methode aufmerksam zu machen, welche die verwickelten und schwer übersichtlichen Rechnungen über die Lage der Punkte eines um einen Punkt gedrehten Körpers außerordentlich vereinfacht und übersichtlich macht, wobei aber die Anwendung der

[1] Beiträge zur Physiologie IV, S. 272.

komplexen Koordinaten für die Punkte einer Ebene dem Leser geläufig sein muß.

Zur Übertragung der Punkte einer Kugelfläche auf eine Ebene wende ich die für Landkarten gewöhnlich gebrauchte stereographische Projektion an. Es sei AB (Fig. 13) die Ebene, auf welche projiziert werden soll, C der Mittelpunkt der Kugel, deren Oberfläche zu projizieren ist, CK das von diesem Mittelpunkte auf die Ebene AB gefällte Lot, welches verlängert die Kugelfläche in D schneidet, so denke ich mir ein Auge in D befindlich, und die Punkte der Kugelfläche auf diejenigen Punkte der Ebene übertragen, auf die sie sich für das in D befindliche Auge projizieren würden. Soll also der Punkt F der Kugelfläche projiziert werden, so ziehe ich die gerade DF, verlängere sie, bis sie in A die Ebene AB schneidet. A ist die Projektion von F.

Es ist bekannt, daß bei einer solchen Projektionsweise die kleinsten Flächenteile der Zeichnung auf der Kugelfläche geometrisch ähnlich werden den entsprechenden Flächenteilen der Abbildung dieser Zeichnung auf der Ebene, wenn auch der Maßstab der Vergrößerung in den verschiedenen Teilen der ebenen Zeichnung verschieden ist. Alle Kreise auf der Kugelfläche werden wieder durch Kreise, bzw. gerade Linien, welche als Kreise von unendlich großem Radius angesehen werden können, dargestellt. Und zwar erscheinen als gerade Linien alle diejenigen Kreise der Kugeloberfläche, welche durch den Punkt D gehen, wie leicht einzusehen ist, wenn man sich die Ebene dieser Kreise konstruiert denkt, welche Ebene die Ebene AB in einer geraden Linie schneidet, die eben die Projektion des betreffenden Kreises ist.

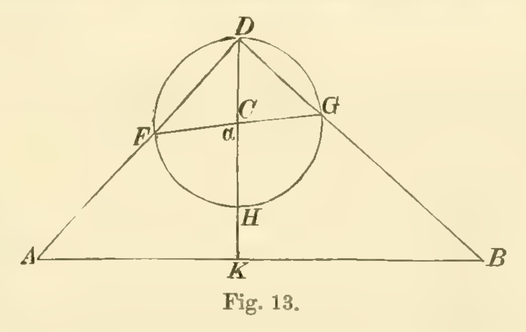


Fig. 13.

Größte Kreise, welche durch den Punkt D gehen und deshalb sich als gerade Linien auf die Ebene projizieren, müssen auch durch den dem Punkte D diametral gegenüberstehenden Punkt H gehen, ihre Projektion also durch den Fußpunkt des Lotes CK. Also die durch den Punkt K, den Mittelpunkt der ebenen Zeichnung, gehenden geraden Linien entsprechen größten Kreisen.

Für die Punkte desjenigen größten Kreises der Kugel, der der Ebene AB parallel ist, wird der Winkel FDK gleich einem halben Rechten, und die Entfernung AK deshalb gleich DK, welche Länge wir als die Längeneinheit betrachten wollen. Dieser Kreis projiziert sich also in die Ebene als ein Kreis vom Radius = 1 mit dem Mittelpunkte K.

Wir wollen ihn den Äquatorialkreis nennen.

Der Äquatorialkreis der Kugel wird von allen andern größten Kreisen der Kugel in zwei diametral gegenüber liegenden Punkten geschnitten. Denen entsprechen auch in der Ebene zwei diametral gegenüber liegende Punkte des projizierten Äquatorialkreises. Daraus folgt, daß solche Kreise der Ebene größten Kreisen der Kugel entsprechen, welche den Äquatorialkreis der Ebene in zwei diametral gegenüber liegenden Punkten schneiden.

Wenn der Punkt G dem Punkte F auf der Kugel diametral gegenüber liegt, so ist FDG ein rechter Winkel, und wenn B die Projektion von G ist, so ist wegen Ähnlichkeit der rechtwinkeligen Dreiecke AKD und DKB

$$AK : DK = DK : KB$$

oder wenn wir, wie festgesetzt ist, DK zur Längeneinheit machen, so ist

$$AK = \frac{1}{KB}\cdot$$

Die Entfernungen der Projektionen diametral auf der Kugel gegenüber liegender Punkte vom Mittelpunkte K sind also gegenseitig reziproke Größen. Natürlich liegen die Projektionen solcher diametraler Punkte auch in einer durch den Mittelpunkt K der Zeichnung gehenden geraden Linie auf entgegengesetzten Seiten des Mittelpunkts.

Die Projektion des dem Mittelpunkte K selbst diametral entgegenstehenden Punkts D der Kugel fällt in unendliche Entfernung.

Bezeichnen wir den Zentriwinkel FCH mit a, so ist der auf gleichem Bogen stehende Peripheriewinkel FDH gleich $\frac{1}{2}a$, und also die Entfernung der Projektion A des Punktes F vom Mittelpunkte K

$$AK = DK \cdot \operatorname{tang}\frac{a}{2}$$

oder da DK gleich Eins gesetzt worden ist,

$$AK = \operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot$$

Betrachten wir nun wie früher den Mittelpunkt C der Kugel als Zentrum eines Koordinatensystems ξ, v, ζ, dessen ξ-Achse die Normale CK sei, und dessen $v\zeta$-Ebene also der Ebene AB parallel liegt. Der Winkel, den die Ebene der Zeichnung mit der ξv-Ebene macht, sei t und v der Radius der Kugel, so sind die Koordinaten des Punktes F

$$\xi = r\cos a$$

$$v = r\sin a\cos t = 2r\,\frac{\operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot\cos t}{1+\operatorname{tang}^2\frac{a}{2}}$$

$$\zeta = r\sin a\sin t = 2r\,\frac{\operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot\sin t}{1+\operatorname{tang}^2\frac{a}{2}}\cdot$$

Und die Koordinaten des Punktes A, die wir mit ξ', v', ζ' bezeichnen wollen, sind

$$\xi' = 1 - r$$

$$v' = AK\cdot\cos t = \operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot\cos t$$

$$\zeta' = AK\cdot\sin t = \operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot\sin t\,.$$

Daraus folgt

$$v' = \frac{v}{2r\cos^2\frac{a}{2}} = \frac{v}{r+\xi}$$

$$\zeta' = \frac{\zeta}{2r\cos^2\frac{a}{2}} = \frac{\zeta}{r+\xi}.$$

Wenn man nun v' und ζ' zu einer einzigen komplexen Variablen vereinigt:

$$\varkappa = v' + i\zeta' = \frac{v+i\zeta}{r+\xi} = \operatorname{tang}\frac{a}{2}\cdot e^{it} \quad \ldots\ldots \quad 11),$$

wo

$$i = \sqrt{-1},$$

so entspricht jedem Werte von $\varkappa$ ein Punkt der Ebene, und also auch ein Punkt der Kugelfläche.

Den Wert von $\varkappa$ für den diametral entgegenstehenden Punkt bezeichnen wir mit $\varkappa'$. Für diesen Punkt haben ξ, v, ζ gleiche Werte, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Es ist also

$$\varkappa' = -\frac{v+i\zeta}{r-\xi} = -\frac{r+\xi}{v-i\zeta}$$

$$= -\frac{1}{v'-i\zeta'} = -\operatorname{cotg}\frac{a}{2}\cdot e^{it}.$$

So haben wir also

$$\left.\begin{array}{ll} \dfrac{v+i\zeta}{r+\xi} = \varkappa, & \dfrac{v-i\zeta}{r+\xi} = -\dfrac{1}{\varkappa'} \\[2ex] \dfrac{r-\xi}{r+\xi} = -\dfrac{\varkappa}{\varkappa'}, & \dfrac{2\xi}{r+\xi} = \dfrac{\varkappa'+\varkappa}{\varkappa'} \end{array}\right| \quad \ldots\ldots \quad 11a).$$

Nun wollen wir die entsprechenden Ausdrücke bilden für die durch Drehung um den Punkt C veränderte Lage der Kugel, deren Koordinaten x, y, z in den Gleichungen 1c) auf Seite 63 gegeben sind. Nennen wir k den Wert, welchen $\varkappa$ nach der Drehung erhält, so haben wir entsprechend der Gleichung 11)

$$k = \frac{y+iz}{r+x}$$

$$= e^{-i\vartheta}\cdot\frac{\xi\cdot\sin\alpha + v(\cos\alpha\cdot\cos\omega - i\cdot\sin\omega) + \zeta(\cos\alpha\cdot\sin\omega + i\cdot\cos\omega)}{r+\xi\cdot\cos\alpha - v\cdot\cos\omega\cdot\sin\alpha - \zeta\cdot\sin\omega\cdot\sin\alpha}.$$

Indem man in dieser Gleichung $\sin\alpha$ und $\cos\alpha$ durch $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ ausdrückt, kann man diesen Ausdruck auf die Form bringen:

$$k = e^{-i\vartheta}\frac{2\xi + (v+i\zeta)e^{-i\omega}\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} - (v-i\zeta)e^{+i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{(r+\xi)\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + (r-\xi)\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} - (v+i\zeta)e^{-i\omega} - (v-i\zeta)e^{i\omega}},$$

indem man Zähler und Nenner dieses Bruchs mit

$$\frac{\varkappa'}{r-\xi}$$

multipliziert, erhält man mit Berücksichtigung der Gleichungen 11a)

$$k = \frac{\varkappa' + \varkappa + \varkappa\varkappa' e^{-i\omega} \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + e^{i\omega} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{\varkappa' \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} - \varkappa \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} - \varkappa'\varkappa e^{-i\omega} + e^{i\omega}} e^{-i\vartheta}$$

oder

$$k = e^{-i\vartheta} \operatorname{cotg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{\left(\varkappa + e^{i\omega} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)\left(\varkappa' + e^{i\omega} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)}{\left(e^{i\omega} - \varkappa \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)\left(e^{i\omega} + \varkappa' \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}\right)}$$

oder da Zähler und Nenner den gemeinsamen Faktor haben $\left(\varkappa' \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + e_{i\omega}\right)$,

$$k = e^{-i(\vartheta + \omega)} \frac{\varkappa + e^{i\omega} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{1 - \varkappa e^{-i\omega} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}} \quad \Bigg| \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11\,\mathrm{b}).$$

So entspricht also jede Drehung der Kugel nur einer linearen Transformation der Variablen $\varkappa$. Indessen nicht jede lineare Transformation entspricht einer bloßen Lagenveränderung der Kugel. Denn setzen wir diese Transformation in die allgemeine Form

$$k = a \frac{\varkappa + b}{1 - \varkappa c},$$

so wird

$$k = 0 \quad \text{für} \quad \varkappa = -b$$

$$k = \infty \quad \text{für} \quad \varkappa = \frac{1}{c}$$

$$\varkappa = 0 \quad \text{für} \quad k = ab$$

$$\varkappa = \infty \quad \text{für} \quad k = -\frac{a}{c}.$$

Nun sind aber 0 und ∞ diametral entgegenstehende Punkte der Kugel, folglich müssen auch

$$-b \quad \text{und} \quad \frac{1}{c}$$

$$ab \quad \text{und} \quad -\frac{a}{c}$$

solche diametral entgegenstehende Punkte sein. Das heißt nach 11 a). es müssen b und c conjugierte komplexe Größen sein, und ebenso ab und $\frac{c}{a}$. Wenn das erstere der Fall ist, so folgt aus dem letzteren, daß a den Modul 1 haben muß. Die allgemeine Form einer solchen Transformation, welche einer Lagenveränderung der Kugel entspricht, ist also

$$k = e^{i\eta} \frac{\varkappa + a + bi}{1 - \varkappa(a - bi)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11\,\mathrm{c}).$$

Daß die Gleichung 11b) in diese Form paßt, ist leicht ersichtlich. Durch diese eine Gleichung, in Verbindung mit der gemachten Annahme

$$\xi^2 + v^2 + \zeta^2 = r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

ist das verwickelte System der Gleichungen 1b) ersetzt.

Um die Drehungsachse zu finden, ist zu bemerken, daß die Punkte der Drehungsachse ihre Lage behalten, für sie also $\varkappa = k$ sein muß. Setzt man dies in 11c), so erhält man eine quadratische Gleichung für $\varkappa$, deren beide Wurzeln die diametral gegenüberliegenden Endpunkte $\varkappa$ und $\varkappa'$ der Drehungsachse sind. Die Gleichung ist

$$0 = \varkappa^2 + \frac{e^{i\eta} - 1}{a - bi}\,\varkappa + \frac{a + bi}{a - bi}\,e^{i\eta}.$$

Daraus folgt, daß

$$\varkappa + \varkappa' = \frac{1 - e^{i\eta}}{a - bi} \qquad \varkappa\varkappa' = \frac{a + bi}{a - bi}\,e^{i\eta}.$$

Da $\varkappa$ und $\varkappa'$ von der Form sind

$$\varkappa = e^{it}\operatorname{tang}\frac{\beta}{2}$$

$$\varkappa' = -\,e^{it}\operatorname{cotg}\frac{\beta}{2},$$

so wird

$$\varkappa + \varkappa' = 2\,e^{it}\operatorname{cotg}\beta; \qquad \varkappa\varkappa' = -\,e^{2it}.$$

Wenn wir setzen

$$a + bi = r\,e^{i\vartheta},$$

so ist

$$e^{it} = \sqrt{-\,\varkappa\varkappa'} = e^{i(\vartheta + \frac{1}{2}\eta)}$$

$$\operatorname{cotg}\beta = \frac{\varkappa + \varkappa'}{2\sqrt{-\varkappa\varkappa'}} = \pm\frac{\sin\left(\frac{1}{2}\eta\right)}{r},$$

wodurch die Lage der Drehungsachse gegeben ist.

Wenn $\eta = 0$, ist auch $\varkappa + \varkappa' = \operatorname{cotg}\beta = 0$, die Drehungsachse liegt also unter dieser Voraussetzung parallel der Ebene der Zeichnung. Eine solche Bewegung entspricht also dem Listingschen Gesetze, wenn man das durch den Mittelpunkt der Kugel auf die Ebene gefällte Lot als die Blicklinie in ihrer Primärlage betrachtet, so daß deren Stellung durch die Koordinate $\varkappa = 0$ bezeichnet ist.

Ich will diese Betrachtungsweise noch benutzen, um die Abweichungswinkel η zu berechnen für den Fall, daß man von einer Anfangslage aus die Messungen beginnt, welche nicht Primärlage ist, eine Aufgabe, die außerordentlich weitläufige Rechnungen erfordert, wenn man sie mittels der Gleichungen 1b) lösen wollte.

Es sei $a + bi$ die Ordinate der Primärstellung der Blicklinie. Ich bringe diese auf den Nullpunkt hin mittels einer dem Listingschen Gesetze entsprechenden Drehung durch die Transformation

$$k = \frac{\varkappa - a + bi}{1 + \varkappa(a - bi)}.$$

Wenn ich jetzt die Blicklinie wieder gemäß dem LISTINGschen Gesetze nach einem neuen Punkt richte, für den $\varkappa = c + di$ ist, k also

$$k = \frac{(c - a) + (d - b)i}{1 + (c + di)(a - bi)},$$

so wird die neue Variable $\mathfrak{k}$ nach dieser Transformation

$$\mathfrak{k} = \frac{k - \dfrac{(c - a) + (d - b)i}{1 + (c + di)(a - bi)}}{1 + k\dfrac{(c - a) - (d - b)i}{1 + (c - di)(a + bi)}}.$$

Setzt man statt k seinen Wert in $\varkappa$ ausgedrückt, so erhält man

$$\mathfrak{k} = \frac{\varkappa - (c + di)}{1 + \varkappa(c + di)} \cdot \frac{1 + (c - di)(a + bi)}{1 + (c + di)(a - bi)}$$

oder

$$\mathfrak{k} = e^{i\eta}\frac{\varkappa - (c + di)}{1 + \varkappa(c - di)},$$

wenn wir setzen

$$e^{i\eta} = \frac{1 + (a + bi)(c - di)}{1 + (a - bi)(c + di)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11\text{d}).$$

Durch diese letztere Gleichung ist die Größe η gegeben, zerlegen wir sie in ihren reellen und imaginären Teil, und setzen wir

$$a + bi = re^{it}$$

$$c + di = \varrho e^{i\tau} = \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\cdot e^{i\tau}$$

$$\cos\eta = \frac{1 + 2r\varrho\cos(t - \tau) + r^2\varrho^2\cos[2(t - \tau)]}{1 + 2r\varrho\cos(t - \tau) + r^2\varrho^2}$$

$$\sin\eta = \frac{2[1 + r\varrho\cos(t - \tau)]\,r\varrho\sin(t - \tau)}{1 + 2r\varrho\cos(t - t) + r^2\varrho^2}.$$

Diese Ausdrücke geben also die Drehungen, wenn man bei den Versuchen nicht von der Primärstellung, sondern von einer anderen Stellung des Auges ausgeht. Ist die ursprüngliche Abweichung r klein, so werden die Ausdrücke übersichtlicher, wenn man den Ausdruck von $\log(e^{i\eta})$ in Gleichung 11d) in eine unendliche Reihe verwandelt,

$$\frac{1}{2}\eta = r\varrho\sin(t - \tau) - \frac{1}{2}r^2\varrho^2\sin 2(t - \tau) + \frac{1}{3}r^3\varrho^3\sin 3(t - \tau) \text{ usw.}$$

Dieser Ausdruck ist von der Form der Gleichung 9), S. 80, und kann zur Berechnung der Fehler bequem gebraucht werden*.

Bestimmung des Drehpunkts der Augen nach DONDERS[1]. Es wird zuerst der horizontale Durchmesser der Hornhaut mit dem Ophthalmometer bestimmt. Zu dem Ende bringt man unmittelbar über dem Ophthalmometer eine kleine Flamme

[1] Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde. Bd. III, Hft. 3, S. 260—281.

* Eine Konstruktionsmethode, für denselben Zweck brauchbar, siehe unten in den Nachträgen. K.

an, die von der Hornhaut gespiegelt wird, und neben dem Ophthalmometer ein horizontal verschiebbares Gesichtszeichen, welches von dem beobachteten Auge fixiert wird. Dieses Auge wird übrigens von der Seite her durch eine helle Lampe stark beleuchtet, gegen deren Strahlen das Ophthalmometer geschützt ist. Man sucht nun das Ophthalmometer so einzustellen, daß jedes Doppelbild des Flammenreflexes mit einem Doppelbild je eines seitlichen Hornhautrandes zusammenfällt. Damit dies für beide Bilder des Lichtreflexes zugleich geschehen kann, muß die Mitte der Hornhaut gerade gegen das Ophthalmometer gekehrt sein. Um dies zu erreichen, muß man das Gesichtszeichen so lange hin und herschieben, bis der genannten Forderung Genüge geleistet wird. Der Winkel, um den die Platten des Ophthalmometers gedreht sind, entspricht dann der halben Breite der Hornhaut, und ist dies nach den auf S. 11 Bd. I gegebenen Regeln daraus zu berechnen. Der Winkel, den die nach dem Auge gerichtete Achse des Ophthalmometers und die nach dem Gesichtszeichen gerichtete Blicklinie des Auges miteinander machen, entspricht der Abweichung der Blicklinie von der Achse der Hornhaut.

Um nun den Bogen zu bestimmen, den die Hornhaut beschreiben muß, um die Länge ihres eigenen queren Durchmessers im Raume zu durchlaufen, wurde vor dem zu untersuchenden Auge ein Ring aufgehängt, in welchem ein feines Haar senkrecht gespannt war. Dann wurde ermittelt, um wieviele Grade (ausgehend von dem Stand, wobei die Hornhautachse auf das Kreuz des Ophthalmometers gerichtet war nach beiden Seiten hin visiert werden mußte, damit bei unbeweglich gehaltenem Kopfe nacheinander jeder von den Rändern der Hornhaut mit dem Haare zusammenfiel. Die gefundene Anzahl von Graden stellte den Winkel dar, den das Auge hierbei um den Drehpunkt beschrieben hatte. Sehr bald stellt sich heraus, daß bei normalen Augen dieser Winkel ungefähr 56° betrug. Donders begann deshalb später jede Messung damit, ein Visier 28° nach links, ein anderes ebensoweit nach rechts von dem erstgenannten Visier, welches zur Einstellung des Lichtreflexes auf die Mitte der Hornhaut gedient hatte, aufzustellen. Der Kopf wurde so gedreht, daß bei dem Fixieren des einen seitlichen Visiers der eine Rand der Hornhaut mit dem Haar zusammenfiel, und es wurde untersucht, ob beim Fixieren des zweiten seitlichen Visiers der entgegengesetzte Rand der Hornhaut dem Haar entsprach. Nur selten war dies vollkommen der Fall; aber es stellte sich doch heraus, ob ein größerer oder ein kleinerer Bogen beschrieben werden mußte. Dementsprechend wurden dann die beiden seitlichen Visiere um gleich viel von dem mittleren entfernt, oder ihm genähert, bis man endlich ein genaues Zusammenfallen der Ränder der Hornhaut mit dem Haare erhielt. Indem man nun schnell einige Male abwechselnd nach dem einen und dem anderen Visier sehen ließ, wurde der Einfluß einer etwaigen früheren Bewegung des Kopfes beseitigt.

Wenn a die halbe Breite der Hornhaut ist, welche man mit dem Ophthalmometer gefunden hat, und β der Winkel, um den jedes seitliche Visier, vom beobachteten Auge gesehen, vom mittleren absteht, so ist der Abstand des Drehpunkts von der horizontalen größten Sehne der Hornhaut gleich a cotang β.

In vielen Fällen, namentlich bei Kurzsichtigen, war die Beweglichkeit des Auges zu beschränkt, um die Hornhaut den notwendigen Raum durchlaufen lassen zu können. In diesen Fällen gebrauchte Donders einen mit zwei parallel ausgespannten Drähten, deren gegenseitiger Abstand (3.02 mm) genau bestimmt war, versehenen Ring. Die Visiere wurden so gestellt, daß abwechselnd der eine Draht mit dem Innen-, der andere mit dem Außenrand der Hornhaut zusammenfiel. Um den durchlaufenen Raum zu ermitteln, war es dann nur nötig, den Abstand der Drähte von der zuvor gefundenen Breite der Hornhaut abzuziehen, und dieser Wert wurde der ferneren Berechnung zugrunde gelegt.

Die Resultate dieser Untersuchungen sind schon oben angegeben.

Prüfung des Drehungsgesetzes der Augen mit Hilfe der Nachbilder. Für normalsichtige Augen und für parallele Stellungen von deren Gesichtslinien ist es

am einfachsten die Versuche vor einer großen mit hellgrauer Tapete überzogenen Wand anzustellen, die ein nicht zu scharf gezeichnetes Muster hat, an dem horizontale und vertikale Linien hervortreten. Man befestigt in der Höhe der Augen ein horizontales rotes Band, auf dem man sich den Mittelpunkt für die Fixation durch einen schwarzen Punkt bezeichnet. Wenn man diesen Punkt kurze Zeit fixiert und dann nach der Tapete hinblickt, sieht man ein hellgrünes Nachbild des Bandes, und kann leicht erkennen, ob dasselbe den horizontalen Linien des Tapetenmusters parallel läuft, oder von ihrer Richtung abweicht.

Um die Richtung der Primärstellung der Blicklinie in Beziehung auf den Kopf zu fixieren, benutze ich ein Brettchen, welches ein Visierzeichen trägt und zwischen die Zähne genommen wird. Es ist in Fig. 14 in geometrischer Projektion abgebildet. Das Brettchen *AB* (13 cm lang, 4 breit) hat bei *A* einen den Zahnreihen entsprechenden bogenförmigen Ausschnitt, bei *B* trägt es eine vierkantige hölzerne Säule, an der ein horizontaler Streifen *CC* aus steifem Papier mit Klebwachs, und daher leicht verschieblich, befestigt ist. Die Ränder des Ausschnittes *A* werden auf beiden Seiten mit einem Wulst von heißem Schellack bedeckt, und wenn dieses zu erhärten beginnt, drückt man die beiden Zahnreihen in den Schellack ab, indem man das Brettchen fest zwischen die Zähne nimmt. Ist das Harz erkaltet, so ist nachher die Lage des Brettchesn zwischen den Zahnreihen unverrückbar festgestellt, und nach jeder Unterbrechung der Versuche immer wieder in genau unveränderter Weise herzustellen.

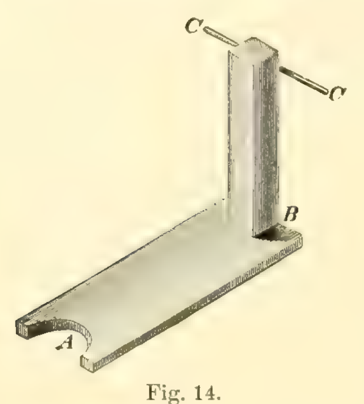


Fig. 14.

Der Papierstreifen *CC* wird so lang gemacht, als die Distanz der Drehpunkte der Augen. Man erkennt dies leicht, wenn man nach einem unendlich entfernten Objekt hinsieht. Dann erscheint der Papierstreifen in einem binokularen Doppelbilde; man macht ihn so lang und dreht ihn so, daß die einander zugekehrten Enden seiner Doppelbilder gerade aufeinander stoßen. Alsdann müssen die spitzen Enden des Streifens voneinander um die Entfernung der Drehpunkte (oder eigentlich der Centra der Visierlinien) beider Augen voneinander entfernt sein und ihre Verbindungslinie mit der Verbindungslinie der beiden Drehpunkte in einer Ebene liegen.

Wenn man nun die Beobachtungen beginnen will, welche entweder mit beiden oder mit je einem Auge ausgeführt werden können, ist es nötig, zuerst die Primärstellung der Augen empirisch zu suchen. Dies geschieht, indem man von der gewählten Stellung aus, der Mitte des roten Streifens gegenüber an der anderen Seite des Zimmers, die Mitte des roten Streifens eine Zeitlang fest fixiert, an dem entsprechenden Ende des Streifens *CC* vorbeiblickend, und dann sein Nachbild entweder gerade nach oben und unten, oder horizontal nach rechts und links verschiebt, und bemerkt, ob dasselbe den horizontalen Linien der Tapete parallel bleibt oder nicht. Ist das letztere der Fall, so muß man den Papierstreifen des Visierbrettchens verschieben, bis man die richtige Stellung desselben gefunden hat. Und zwar muß man den Papierstreifen weiter nach links schieben, wenn man nach oben blickend das linke Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tieferstehend findet. Findet man nach oben blickend dagegen das rechte Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tiefer, so verschiebt man nach rechts. Man verschiebe den Streifen dagegen nach oben, wenn man nach links blickend das linke, nach rechts blickend das rechte Ende des Nachbildes tieferstehend findet, und umgekehrt.

Hat man endlich für jedes Auge die Stellung des Visierzeichens gefunden, wobei das Auge in die Primärstellung kommt, so ist dadurch zunächst konstatiert, daß es eine Lage des Auges gibt, von der aus sich der Blick horizontal fortbewegt

durch Drehung um eine vertikale Achse und vertikal durch Drehung um eine horizontale Achse.

Während aber bei der Verschiebung des Blickes gerade nach oben oder gerade nach unten, und gerade nach rechts oder links die Nachbilder horizontaler und vertikaler Urbilder horizontal und vertikal bleiben, findet man, daß dies nicht gilt für die Verschiebung des Blickes schräg nach aufwärts oder abwärts. Man findet vielmehr, daß

1. bei der Richtung des Blickes nach rechts oben oder links unten
   das Nachbild einer Horizontallinie gegen die Linien der Wand links gedreht,
   das Nachbild einer Vertikallinie rechts gedreht erscheint, und
2. bei der Richtung des Blickes nach links oben oder rechts unten
   das Nachbild einer Horizontallinie rechts gedreht,
   das einer Vertikallinie links gedreht erscheint.

Da horizontale und vertikale Linien verschiedene Drehung zeigen, so ergibt sich daraus schon, daß zwischen ihnen Linien existieren müssen, deren Nachbilder der ursprünglichen Richtung parallel sind.

Am einfachsten ist es nun, den Kopf so seitwärts zu neigen, daß man zur Durchlaufung der horizontalen und vertikalen Linien der Wand schräge Bewegungen des Auges zum Kopfe auszuführen hat. Dadurch, daß man auch bei solcher Kopfstellung an dem Visierzeichen vorbei nach dem Mittelpunkt des roten Streifens blickt, sichert man sich, daß man wieder als Anfangsstellung die Primärstellung des Auges einhält. Die Richtung, in welcher sich die Bilder der beiden Spitzen des als Visierzeichen dienenden Papierstreifens auf die Wand projizieren, bezeichnet auf dieser die Richtung der Verbindungslinie der Drehpunkte. Bei solchen Augen, deren Bewegungen dem Gesetze von Listing folgen, bleiben dann auch bei seitwärts geneigtem Kopfe die Nachbilder horizontaler Streifen den Horizontallinien der Wand parallel, wenn man den Blickpunkt längs der Vertikallinie und der Horizontallinie verschiebt, die durch die Mitte des roten Streifens gehen. Ebenso verhält es sich mit den Nachbildern eines vertikalen Streifens in Beziehung auf die vertikalen Linien der Tapete.

Diese Beobachtungen, wobei das Nachbild auf eine verhältnismäßig entfernte Wand geworfen wird, haben den Vorteil, daß kleine Verschiebungen des Kopfes nach rechts oder links, oben oder unten, einen verschwindend kleinen Einfluß auf die durch das Visierbrettchen gesicherte Lage der Blicklinie haben, und daß ferner die Augen von selbst in paralleler Stellung erhalten werden. Dagegen sind die Wände unserer Zimmer in der Regel nicht groß genug, um auch die Prüfung in den extremen Stellungen der Blicklinie bei hinreichend großer Entfernung von der Wand vornehmen zu lassen, und für Kurzsichtige ist diese Beobachtungsart nicht zu gebrauchen, weil sie ohne Brille nicht für die Wand akkommodieren können, und Brillengläser, wenn sie nicht zentrisch und senkrecht zur Gesichtslinie stehen, die scheinbare Neigung der gesehenen Linien verändern können. Für Beobachtungen in der Nähe habe ich die von mir früher beschriebene Methode abgeändert, um auch den Einfluß der Konvergenz sicherer untersuchen und die Größe und Form des Gesichtsfeldes bestimmen zu können.

Als Gesichtsfeld dient eine an der Wand befestigte große hölzerne Tafel, die mit hellgrauem Papier glatt überzogen ist. Um die Stellung des Kopfes vor dieser sicher fixieren zu können, ist vor ihr in einer für die Akkommodation des Beobachters passenden Entfernung ein kleines Tischchen aufgestellt und mit eisernen Klammern am Boden befestigt. Auf dem Tischchen ist ein eiserner Halter mit beweglichen Armen befestigt, wie man ihn in chemischen Laboratorien vielfach gebraucht, und dieser hält ein Brettchen ähnlich dem der Fig. 14, aber ohne die Säule und das Visierzeichen. Das Brettchen dient nur dazu, dem Kopfe des Beobachters, wenn er die Zähne darauf festbeißt, eine sichere Stellung der Tafel gegen-

über zu geben. Mittels der Zähne kann die Stellung des Kopfes viel besser gesichert werden, als durch irgendwelche Befestigung, welche nur die Weichteile desselben unmittelbar unterstützt. Ein zweiter verstellbarer horizontaler Arm des Halters wird so festgeschraubt, daß die Stirn gegen ihn anliegt. Auf der Tafel wird dann, dem einen oder anderen Auge gegenüber, ein passend gefärbter Streifen aus sehr steifem Papier oder dünnem Holz befestigt, der in seiner Mitte mit einem Stechknöpfchen, und um dieses drehbar, befestigt wird. Den Streifen mache ich entweder halb weiß und halb schwarz, oder halb grün und halb rot, so daß die Trennungslinie beider Farben der Länge des Streifens parallel durch die Mitte seiner Breite hinläuft. Diese Trennungslinie gibt dann ein gut gezeichnetes Nachbild. Ferner werden feine schwarze Fäden horizontal und vertikal über die Mitte des Streifens hingespannt, und die Stellung des Zahnbrettchens so lange geändert, bis die Nachbilder des horizontalen Streifens längs des horizontalen Fadens verschoben diesem parallel bleiben, und ebenso die Nachbilder des vertikal gestellten Streifens längs des vertikalen Fadens. Dabei ist aber zu bemerken, daß die Gesichtslinien parallel gehalten werden müssen, und um dies zu kontrollieren, mache ich in der Entfernung meiner Augen voneinander (68 mm) Punkte auf den Stellen der Tafel, nach denen ich hinblicke, den einen dicht an der Linie, nach der ich hinblicke, den anderen in gleicher Höhe seitwärts, so daß, wenn ich die beiden Punkte mit parallelen Gesichtslinien betrachtete, sie sich scheinbar vereinigen.

Auf diese Weise kann man die Primärlage des einen und anderen Auges finden, — sie liegen bei mir um die Distanz der Augen selbst voneinander entfernt, — dann kann man nachher dem Streifen, von dem das Nachbild genommen wird, beliebige schräge Richtungen geben, und Fäden über seine Mittellinie hinspannen, um längs dieser die Nachbilder zu verschieben. Um konvergente Gesichtslinien zu haben, kann man, nachdem das Nachbild in einem Auge entwickelt ist, entweder einen Punkt der Tafel selbst mit beiden Augen fixieren, oder beliebige hingesetzte Punkte mit konvergenten oder überkreuzten Blicklinien zusammenfallen machen.

Wenn dann, wie bei Konvergenzstellungen, die Nachbilder nicht genau mit dem Faden zusammenfallen, längs dessen Richtung man den Blick hinbewegt hat, so kann man den Streifen selbst schief gegen den Faden stellen, und diejenige Stellung desselben suchen, deren Nachbild dem betreffenden peripherischen Teile des Fadens parallel wird. Der Winkel zwischen dem Streifen und dem Faden läßt sich leicht berechnen, wenn man den Abstand mißt, den der über den Streifen laufende Faden an beiden Enden desselben mit seiner Mittellinie macht. Oder bequemer, kann man auch gleich auf den beiden Enden des Streifens eine Gradeinteilung anbringen, die nur wenige Grade zu umfassen braucht.

Die Genauigkeit, mit welcher die Vergleichung der Richtung der Nachbilder mit der der Fäden geschieht, geht bis zu einem halben Grade etwa. Das ist freilich keine mit der von astronomischen Beobachtungen zu vergleichende Genauigkeit; aber ich glaube, es wäre bei der Natur des Gegenstandes illusorisch, nach einer sehr viel größeren Genauigkeit zu streben. Denn schon bei diesen Beobachtungen findet man gewisse kleine Veränderungen, die nicht bloß von der Konvergenz, sondern auch von dem Wege abhängen, auf dem das Auge in die betreffende Stellung gebracht worden ist, und selbst an verschiedenen Tagen zu wechseln scheinen. Solche habe ich selbst nicht ganz selten gesehen, namentlich bei Schrägstellungen des Auges, noch deutlicher und größer waren sie bei Dr. Berthold, der in meinem Laboratorium arbeitete, und ich vermute, daß sie überhaupt bei kurzsichtigen Augen größer sein werden, weil diese, hauptsächlich auf nahe Gegenstände angewiesen, an diesen je nach dem Grade der Konvergenz stärker wechselnde Raddrehungen bei derselben Richtung der Blicklinie einüben müssen.

Herr E. Hering hat Versuche zur Kontrolle der Genauigkeit der Nachbildversuche angestellt, aus denen er schließt, daß Irrtümer in der Vergleichung ihrer Richtung mit objektiven Linien vorkommen könnten, welche einen Spielraum bis zu

5 Grad hätten. Solche Irrtümer muß ich bei gut entwickelten Nachbildern nach scharfer Fixation des Objekts für geradezu unmöglich erklären; ich habe schon vorher angeführt, daß bei sorgfältiger Anstellung der Versuche die Fehler einen halben Grad nicht überschreiten. Abweichungen von einem Grad, die ich an dem beschriebenen Apparat leicht absichtlich herstellen konnte, sind bei guter Ausführung des Versuches sicher zu erkennen. Ich schließe vielmehr aus den Versuchen von Herrn Hering, daß sein Auge entsprechende Schwankungen in seiner Stellung ausgeführt hat, was namentlich dadurch bedingt sein kann, daß er das fixierte Objekt in 10 Zoll Entfernung vor sich hatte, und bei einäugiger längerer Betrachtung eines so nahen Objekts starke Schwankungen der Konvergenz vorzukommen pflegen.

Die Methode der Nachbilder ist unter den bisher bekannten Methoden zur Bestimmung der Stellung eines jeden einzelnen Auges, unabhängig vom andern, die zuverlässigste, wenn sie gut eingeübt ist. Sie erfordert namentlich in der Form, wie ich sie oben beschrieben habe, nicht, — was mir von großem Gewicht zu sein scheint, — daß das Auge lange in peripherischen Stellungen verweile, sondern jeder einzelne Versuch ist schnell beendet.

Auch die Methode von Wundt[1] benutzt die Nachbilder zur Bestimmung der Augenstellungen. Derselbe entwirft die Nachbilder auf eine verstellbare und gegen die Blicklinie immer senkrecht stehende Scheibe, die an einem beweglichen Hebelarm befestigt ist. Sein Apparat hatte Winkelteilungen, um die oben als *Longitudo*, *Latitudo* bezeichneten Winkel und die Raddrehung des vertikalen Meridians gegen die Vertikallinie abzulesen.

Prüfung des Drehungsgesetzes mittels des blinden Flecks. Diese Methode erlaubt ebenfalls, die Stellung jedes einzelnen Auges ganz unabhängig vom andern zu bestimmen. Sie wurde zuerst von A. Fick[2] angewendet. An der grauen Wand eines geräumigen Zimmers war in der Höhe, in welcher sich das Auge des auf einem Stuhle sitzenden Beobachters befand, ein geeignetes kleines Fixationsobjekt angebracht, ein weißer Kreis mit schwarzem zackigen Rande. Für das Auge wurde ein etwas über 6 m entfernter Standort so gewählt, daß die Sehlinie, wenn sie das Objekt fixierte, die erwähnte Wand senkrecht traf. Unter diesem Standort waren am Boden die Stellungen bezeichnet, welche die Füße des Stuhls haben mußten, wenn seine vordere Kante bestimmte Neigungen gegen die Wand haben sollte. Bei allen diesen Stellungen des Stuhles blieb die Mitte zwischen den hinteren Füßen an demselben Platze. Fick saß auf diesem Stuhle, den Rücken angelehnt, den Kopf geradeaus gerichtet, und fand, daß er auf diese Weise genügend sicher die Medianebene des Kopfes senkrecht zu der anderen Kante des Stuhles einstellte. Um die Neigung des Kopfes gegen die Horizontale zu beurteilen, wurde ein hölzerner über den Kopf gehender Bügel mittels zweier Schrauben in den Gehörgängen befestigt und ein von seiner Mitte herabgehender gebogener Eisenstab auf die Nasenwurzel gestützt. Der Bügel hatte somit eine feste Lage zum Kopfe. An der in das linke Ohr gehenden Schraube hing ein Lot, das vor einem mit dem Bügel fest verbundenen Gradbogen spielte. So konnte die Neigung des Kopfes oder einer in der Medianebene gedachten Geraden gegen den Horizont bestimmt werden.

An der Wand war ein Blatt grauen Kartons drehbar um einen Stift im Fixationspunkte befestigt. Mittels einer über eine Rolle laufenden Schnur konnte der Beobachtende den Karton drehen. Auf diesem war ein schwarzer Fleck gemalt, in einer solchen Entfernung, daß er bei passender Einstellung in den blinden Fleck fiel. Ein Gehilfe las die Neigung des Kopfes ab, und wenn eine bestimmte Neigung hergestellt war, stellte sich der Beobachter mittels der Schnur den Karton so, daß der schwarze Fleck verschwand. An einer Tangentenskala konnte die Drehung des Kartons abgelesen werden. So wurde bestimmt, um wieviel das Auge gegen seine

[1] Archiv für Ophthalmologie. Bd. VIII, 2. S. 16 und 17.

[2] Moleschotts Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen. V. 193—233.

Anfangsstellung gedreht war. Die Drehung des Stuhles maß den als *Longitudo* bezeichneten Winkel, der Gradbogen am Ohr die *Latitudo*. Es kamen bei Wiederholung der Versuche Differenzen der Raddrehungswinkel vor bis zu 3 Grad; wenn man die Stifte, die in die Ohren gesteckt waren, mit der Lehne des Stuhles fest verbände und einen recht hellen weißen Fleck auf dunklem Grunde gebrauchte, der der Projektion des blinden Flecks an Größe und Gestalt genau entspräche, würde sich vielleicht eine größere Genauigkeit dieser Methode erreichen lassen.

Meissner[1] hat den Kopf festgestellt und das Gesichtszeichen, auf welchem sich der dunkle Fleck befand, bewegt. Der Kopf wurde zu dem Ende passend so festgestellt, daß sich das Auge in dem Mittelpunkte eines vertikalen halben Gradbogens von 10 Zoll Radius befand, der um seine vertikale Achse um einen zu messenden Winkel gedreht werden konnte (Ficks *Longitudo*, Meissners *Latitudo*). An dem Gradbogen verschieblich; um einen Winkel, der abgelesen werden konnte (Ficks *Latitudo*, Meissners *Longitudo*), befand sich ein Schieber, der an seiner dem Zentrum zugekehrten Seite, um eine eben dahin gerichtete Achse drehbar, die Scheibe mit dem dunklen Flecke trug. Meissners Resultate sind in der hier folgenden Tabelle zusammengestellt; und zwar ist der unmittelbar abgelesene Winkel, der dem k' der Gleichung 4 e) entspricht, angegeben.

		Nasenwärts				Schläfenwärts		
		+ 30	+ 20	+ 10	0	– 10	– 20	– 30
Gehoben	– 30	– 3	0	+ 2	0	+ 3	+ 6	+ 10
	– 15	+ 0,5	+ 1,5	+ 2,5	0	+ 1,5	+ 3	+ 5
	0	+ 7	+ 5	+ 4	0	0	0	0
Gesenkt	+ 15	+ 12,5	+ 8,5	+ 5	0	– 1,5	– 2,5	– 5
	+ 30	+ 19	+ 13	+ 7	0	– 3	– 6	– 9,5
	+ 35	+ 20,5	+ 14	+ 7,5	0	– 3	– 7	– 10
	+ 40	+ 20,5	+ 14	+ 7	0	– 3	– 7,5	– 11
	+ 45	+ 21	+ 14,5	+ 7	0	– 3	– 8	– 12
	+ 50	+ 21,5	+ 14,5	+ 7	0	– 3	– 8,5	– 13

Der ziemlich unregelmäßige Gang der Werte macht es wahrscheinlich, daß Konvergenzänderungen, die bei einäugiger Fixierung eines sehr nahen Objekts schwer zu vermeiden sind, Einfluß gehabt haben. Meissner selbst betrachtet seine Versuche als annähernd übereinstimmend mit dem Gesetze von Listing, glaubt aber, daß für die nasenwärts gerichteten Stellungen eine andere Primärlage zu nehmen sei, die unter 45° gegen die Horizontale nach unten gerichtet ist, für die nach außen gewendeten Stellungen dagegen liege die Primärlage in der Horizontalebene selbst. Um dies Verhältnis heraustreten zu lassen, hat er die Versuche noch einer Umrechnung unterworfen.

Von Ficks Versuchen habe ich die Mittelwerte in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Longitudo	*Latitudo* – 33	– 30	– 28	– 14	– 11	– 6	0	+ 1	+ 4	+ 18	+ 45
– 29			– 4,7°								
– 26					+ 3,5°						
– 21									+ 1,5		
– 14		– 2°								+ 5,7°	
– 13				+ 2,5°							
– 10								+ 2°			
0	+ 2,5						0				+ 0,1°
+ 10								+ 0,1°			
+ 13				+ 1,7							
+ 14		– 4,7°								– 1,8°	
+ 21									– 0,3°		
+ 26					+ 3,4°						
+ 29			+ 7,5								
+ 38						+ 2,9°				– 3,3°	

[1] Zeitschrift für rationelle Medizin. Reihe 3. Bd. VIII.

Prüfung der Augenstellungen mittels der Vergleichung korrespondierender Bilder beider Augen. Die hierher gehörigen Methoden lassen, wie es scheint, eine viel größere Genauigkeit zu, als die der Methode der Nachbilder; sie können aber nur dazu dienen, die Stellungen beider Augen miteinander zu vergleichen, nicht die Stellung eines jeden einzelnen Auges zu finden. Sie sind deshalb sehr brauchbar, um die kleinen individuellen Abweichungen der Bewegungen vom Listingschen Gesetz zu finden. Auch kommt es in gewissen Fällen, namentlich für die Theorie des binokularen Sehens gerade wesentlich darauf an, die Differenzen in der Stellung beider Augen zu finden.

Die erste Anwendung dieser Methoden rührt von Meissner[1] her. Er machte darauf aufmerksam, daß, wenn man einen gerade vor sich und normal zur Blickebene gehaltenen Draht so betrachte, daß man die Augen auf einen nahe vor oder nahe hinter dem Drahte gelegenen Punkt konvergieren lasse, der Draht der Regel nach nicht in parallelen Doppelbildern erscheine, sondern in solchen, die eine gewisse Neigung gegeneinander haben, und daß man den Draht selbst gegen die Visierebene neigen müsse, um ihn in parallelen Doppelbildern zu sehen. Aus der Lage des Drahtes gegen die Visierebene ergab sich dann leicht die Stellung, welche die vertikalen korrespondierenden Meridiane beider Augen haben, und daraus kann man die Raddrehung des Auges wenigstens für die medianen Lagen des Konvergenzpunktes ableiten. Meissner fand durch die nach dieser von ihm sehr sinnreich erdachten Methode ausgeführten Untersuchungen im wesentlichen das Gesetz von Listing bestätigt, wenn auch gewisse Fehlerquellen, die erst durch spätere Untersuchungen aufgefunden wurden, gewisse Korrektionen seiner Resultate notwendig machen möchten. Erstens nämlich kannte er noch nicht den Unterschied der scheinbar vertikalen Meridiane des Auges von den wirklichen, und glaubte, der früher allgemein gemachten Annahme entsprechend, daß unendlich entfernte Vertikallinien sich auf identischen Meridianen beider Augen abbilden müßten, was bei den meisten Augen nicht der Fall ist. Zweitens kannte er nicht den von Volkmann aufgefundenen Einfluß der Konvergenz auf die Raddrehungen jedes einzelnen Auges. Auch kann wohl die Beurteilung des Parallelismus der Doppelbilder durch den Umstand beeinträchtigt werden, daß das eine Ende des Drahtes den Augen bald um eine größere, bald um eine kleinere Strecke näher ist, was der Beobachter weiß und wahrnimmt, und daß dadurch die Anschauung des Parallelismus der Doppelbilder als zweier geneigter körperlichen Linien sich einstellen kann, statt der Anschauung ihres Parallelismus im Gesichtsfelde, auf die es ankommt.

Es möchte deshalb die von Volkmann[2] gemachte Abänderung des Verfahrens von Meissner zweckmäßiger sein: Volkmann hat an einer vor den Augen gelegenen senkrechten Wand zwei Drehscheiben so angebracht, daß der Drehpunkt einer jeden in der Blicklinie des bezüglichen, auf unendliche Ferne gerichteten Auges liegt. Auf jeder Scheibe ist eine feine Linie verzeichnet, welche das Zentrum der Scheibe schneidet und also mit der Umdrehung dieser ihre Lage ändert. Zur Bestimmung der Lagenveränderung ist im Umkreise der Scheibe ein Gradmesser angebracht. Der Beobachter betrachtet die beiden auf den Scheiben verzeichneten Linien unter minimaler Konvergenz der Augen, so daß er sie in wenig distanten Doppelbildern sieht, und sucht diese Doppelbilder durch Drehung der einen Scheibe parallel zu stellen.

Durch häufige Wiederholung solcher Einstellungen kann man sehr genaue Mittelwerte erlangen. Volkmann hat diese Methode zwar nicht für verschiedene Kopfstellungen angewendet, um Schlüsse über die Bewegungen zu machen, aber sie läßt sich dazu anwenden, wenn man die Scheiben bei verschiedenen Kopfstellungen betrachtet.

---

[1] Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1851.

[2] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig. 1864. Heft 2. S. 199 bis 240.

Volkmanns Apparat läßt sich, wie ich gefunden habe, hierfür noch zweckmäßig vereinfachen. Für die Prüfung der Parallelstellungen meiner eigenen Augen habe ich an einer vertikalen Holztafel zwei durch kleine Gewichte gespannte Fäden aufgehängt, einen weißen vor schwarzem Grunde und einen schwarzen vor weißem Grunde. Die Entfernung der Stifte, an denen die Fäden hingen, wurde so gewählt, daß bei den Beobachtungen die fixierten Mittelpunkte der Fäden die Distanz meiner Augen, 68 mm, hatten. Nach unten hin lehnten sich die Fäden an zwei Nadeln, die in das Holz eingesteckt waren und die Fäden etwas konvergieren machten. Hinter der Mitte der Fäden, die zu fixieren war, war eine horizontale Linie gezogen, gerade in der Höhe meiner Augen. Die Fäden wurden mit parallel gerichteten Gesichtslinien betrachtet, wobei sie in demselben Ort des gemeinschaftlichen Sehfeldes zu liegen kommen, und die Nadel am unteren Ende des einen wurde so lange verschoben, bis sich die Fäden nicht mehr kreuzten, und bei schwacher Konvergenz nicht mehr in divergenten, sondern in parallelen Bildern erschienen. Dadurch daß man den Fäden verschiedene Farbe gibt, läßt sich ihre Kongruenz im Gesichtsfelde besser beurteilen, als wenn sie gleichfarbig sind, wobei sie leicht stereoskopisch verschmelzen, selbst wenn sie sich durchaus noch nicht decken. Wenn man sie als nahe Doppelbilder sieht, so erscheinen ihre Mitten getrennt und ihre Enden vereinigt. Man muß dann darauf achten, daß die Vereinigung nach oben und nach unten hin in derselben Weise vor sich geht*.

Indem ich den Kopf vornüber und hintenüber neigte, konnte ich diese Versuche mit parallel gesenkten und parallel gehobenen Gesichtslinien wiederholen, und fand in der Tat kleine Abweichungen von dem durch Listings Gesetz hierbei geforderten vollkommenen Parallelismus ihrer Stellungen, so daß der Winkel der scheinbar vertikalen Meridiane bei parallel bis zur oberen Grenze des Blickfeldes gehobenen Blicklinien um 0,3° größer ist als bei parallelem tiefsten Stande der Blicklinien, und sich hierbei im ersteren Fall das obere Ende des vertikalen Meridians jedes Auges um 0,15° mehr nach außen gedreht findet, als in der zweiten Stellung. Bei späteren Wiederholungen dieser Versuche fand ich es noch vorteilhafter, dem einen Auge als Objekt einen geradlinig begrenzten roten Streifen von 3 mm Breite, dem andern einen blauen Faden, beide auf schwarzem Grunde zu zeigen. Der Faden muß in der Mitte des roten Streifens erscheinen.

Volkmann selbst hat seine Versuche über die Augenstellungen nach einer Abänderung dieser Methode ausgeführt. Nämlich statt der Drehscheiben mit Durchmessern wendete er solche mit je einem ausgezogenen Radius an, und bemühte sich bei binokularer Betrachtung diese Radien scheinbar in eine gerade Linie zu stellen. Der Kopf wurde dabei passend festgestellt; die Drehscheiben wurden in zwei dunkle Röhren eingesetzt, welche mittels passender Gelenke beliebig gerichtet werden konnten, so daß jedes Auge durch je eine Röhre auf eine Drehscheibe hinsah, und dieselbe immer senkrecht zur Blicklinie des Auges eingestellt blieb.

Versuche mit parallelen Gesichtslinien angestellt ergaben, daß die Abweichungen beider Augen von der durch das Listingsche Gesetz geforderten Kongruenz bei Volkmanns Augen sehr gering sind. Beim Blicke gerade nach oben oder nach unten, gerade nach rechts oder links von einer Stellung aus, welche Volkmann mittels Nachbildversuchen als Primärstellung gefunden hatte, ergaben gar keine Differenz. Richtungen der Blicklinie schräg nach oben oder unten dagegen gaben kleine Abweichungen. Die folgenden Zahlen sind Mittelzahlen aus je 60 Beobachtungen, wobei in je 30 der bewegliche Radius dem rechten, in je 30 anderen dem linken Auge angehörte, und geben die Kreuzungswinkel der scheinbar eine senkrechte gerade Linie bildenden Radien

Primärstellung	2,21°
30 Grad nach oben rechts . . .	2,74°
Ebenso weit nach oben links . .	2,92°
Ebenso nach unten links . . .	1,31°
Ebenso nach unten rechts . . .	1,41°.

* Vgl. über die Methodik Anm. 11. K.

Die größte Abweichung von dem Winkel der Primärstellung ist 0,9°, was für jedes Auge bei gleichmäßiger Verteilung des Fehlers 0,45° geben würde, eine Größe, die durch Versuche mit Nachbildern allerdings nicht mehr zu entdecken sein würde.

Volkmann fand ferner nach derselben Methode, daß bei Konvergenz auf einen 30 cm entfernten Punkt in der Horizontalebene der Winkel der scheinbar vertikalen Meridiane von 2,15° bis auf 4,16° stieg, so daß sich jedes Auge dabei um etwa einen Grad drehte, was bei derselben Richtung der Gesichtslinie und paralleler Stellung der anderen Gesichtslinie nicht der Fall gewesen sein würde.

Ich finde an meinen eigenen Augen eine sehr kleine Abweichung bei der Konvergenz, aber in demselben Sinne wie Volkmann. Die Beobachtung geschah mittels eines feinen schwarzen Fadens, dessen Mitte durch ein Nadelöhr gezogen war. Die Nadel war in dem ebenen Felde einer weiß angestrichenen Tür in der Höhe meiner Augen befestigt, die Enden des Fadens über zwei andere in gleicher Höhe befestigte Nadeln geleitet und durch Gewichte gespannt. Der Faden bildete also zwei gerade Linien, die in dem Nadelöhr unter einem veränderlichen Winkel zusammenstießen. Je nachdem man die seitlichen Nadeln etwas höher oder tiefer einsteckte, konnte man diesen Winkel nach oben oder nach unten sich öffnen lassen. Die beiden Schenkel des Winkels blieben dabei immer in einer der Türfläche parallelen Ebene. Wenn ich mit parallelen Gesichtslinien sehen wollte, hielt ich vor die mittlere Nadel einen senkrechten Streifen steifen Papiers von 68 mm Breite. Bei parallelen Blicklinien treffen dann die noch sichtbaren seitlichen Teile der Fäden scheinbar in der Mitte zusammen und bilden einen Winkel. Ich veränderte die Stellung der Nadeln so lange, bis mir dieser Winkel gleich zwei Rechten erschien, also seine beiden Schenkel in eine gerade Linie fielen. Dann fixierte ich das Öhr der Nadel aus 20 cm Entfernung, während ich zwischen meinem Nasenrücken und der Nadel ein Blatt Papier so anbrachte, daß ich mit jedem Auge nur die gleichseitige Hälfte des Fadens sehen konnte. Wenn die Fixation auch in der Primärstellung der Visierebene geschah, erschien mir der Faden doch nicht mehr geradlinig, sondern ich mußte die eine Hälfte desselben etwas senken, damit er wieder geradlinig erschien. Die der Konvergenz auf 20 cm entsprechende Drehung jedes meiner Augen würde hiernach 17 Minuten (0,28°) betragen, während sie bei Volkmann 1,37° betrug.

Bei Volkmann ist diese Drehung stark genug, daß er sie an dem Nachbilde einer gefärbten vertikalen Linie wahrnehmen kann, welche er mit einem Auge bei parallelen Blicklinien fixiert hat, wenn er das Nachbild nachher mit konvergenten Blicklinien dicht neben die Linie entwirft. Dasselbe gelang auch Prof. Welcker bei Volkmann. Ganz ähnliche Versuche hatte übrigens auch J. B. Schuurman[1] angestellt mit negativem Erfolge, während Prof. Donders bei angestrengter Konvergenz Drehungen von 1° bis 3° bemerkte, in demselben Sinne wie Volkmann und ich. Viel deutlichere Abweichungen, durch Konvergenz bewirkt, bemerkte ich, wie schon oben gesagt ist, bei der Untersuchung der Nachbilder in peripherischen Stellungen der Blicklinie.

Bestimmungen der Ansatzpunkte und Drehungsachsen für die Augenmuskeln. Die Wirkung dieser Muskeln ergibt sich leicht aus ihrer Lage und Befestigung. Da ihre Sehnen alle eine Strecke über den Augapfel hin verlaufen und sich seiner Wölbung anlegen, wie Bänder, welche über eine Rolle laufen, so üben alle diese Muskeln einen Zug auf den Augapfel in tangentialer Richtung aus. Um die Richtung dieses Zuges genauer zu bestimmen, muß man durch den Punkt, wo sich die Sehne anlegt, eine Tangente an den Augapfel legen, welche für den oberen schiefen Augenmuskel nach dessen Sehnenrolle hin zu ziehen ist, für die übrigen Muskeln dagegen nach ihrem knöchernen Ursprunge hin.

Da der Augapfel in seiner natürlichen Befestigung nur Drehungen um seinen

[1] Vergelijkend Onderzoek. der Beweging van het Oog; Academisch Proefschrift. Utrecht 1863.

Mittelpunkt ausführt, so haben wir die Wirkung der Muskeln auch nur insofern zu beachten, als dadurch solche Drehungen entstehen. Wird ein Körper, der frei um einen Punkt drehbar ist, wie der Augapfel, durch eine Kraft exzentrisch angegriffen, so findet man die Richtung der daraus entstehenden Drehung, wenn man durch die Richtung der Zugkraft und durch den Drehpunkt eine Ebene legt und im Drehpunkt auf dieser ein Lot errichtet. Dieses Lot ist die Achse der betreffenden Drehung. Die Richtung des Zuges ist, wie wir gesehen haben, bestimmt durch den Punkt, wo sich die Sehne an den Muskel legt, und den Punkt, wo der Muskel (oder beziehlich seine Sehnenrolle) am Knochen festsitzt. Durch diese beiden Punkte und den Drehpunkt des Auges ist also jedesmal die Lage der zur Drehungsachse normalen Ebene bestimmt. Wenn man also die Lage jener drei Punkte geometrisch bestimmt, läßt sich daraus die Lage der Drehungsachse finden.

Solche geometrische Bestimmungen sind von Ruete[1] und A. Fick gemacht worden. Ruete nahm zuerst die Schädeldecke durch einen Sägenschnitt nahe über der Orbita weg, stellte dann den Kopf so auf, daß er die Stellung hatte, die er im Leben bei aufrechter Stellung zu haben pflegt. Darauf wurde ein Sägenschnitt in der Mitte zwischen beiden Augenhöhlen perpendikulär durch das *Os frontis*, durch die Mitte der *Crista galli*, der *Sella turcica* und den Rücken der Nase so tief heruntergeführt, daß er einen geraden, vorn überstehenden Draht fest einlegen konnte, in einer Richtung, die mit den gerade nach vorn und horizontal gewendeten Sehachsen parallel stand, um sich später nach dieser Linie orientieren zu können. Darauf wurden beide Augen bis zur normalen Spannung aufgeblasen, dann horizontal parallel gerichtet und durch jedes Auge ein feiner, sehr zugespitzter Stahldraht in der Richtung der optischen Achse bis hinten in den Knochen der Orbita langsam rotierend durchgestoßen, um die Augen in ihrer Lage zu fixieren. Um die Lage der Augen noch mehr zu sichern, wurde in einigen Fällen auch noch eine Decke von Gips über die geschlossenen Augenlider gegossen.

Darauf wurden die Augenhöhlen vorsichtig von oben geöffnet und die Ursprünge und Insertionen der Muskeln sorgfältig frei präpariert, ohne von dem dazwischenliegenden Fett mehr wegzunehmen, als zur Darstellung der genannten Punkte nötig war. Die Winkel, welche die Muskeln mit der optischen Achse bildeten, wurden dadurch gemessen, daß winklig gebogene Drähte angelegt wurden. Die Abstände der Ursprünge und Insertionen der Muskeln vom Mittelpunkte der Augen nach oben und unten, nach rechts und links, nach hinten und vorn maß er mit dem Zirkel. Die Messungen wurden von drei Beobachtern wiederholt.

In letzterer Beziehung möchte es indessen wohl vorzuziehen sein, die Entfernungen der Muskelursprünge und -ansätze, des Scheitels der Hornhaut und des Sehnerveneintritts von drei festen Punkten zu messen, wie Fick getan hat, und danach die Koordinaten und die Lage des Mittelpunkts des Augapfels zu berechnen, da die Lage des letztern anatomisch nicht charakterisiert ist, und direkte Messungen des senkrechten oder horizontalen Abstandes zweier nicht genau senkrecht oder horizontal nebeneinander liegender Punkte mit dem Zirkel ziemlich unsicher bleiben müssen. Im Mittel aus den Messungen an vier Köpfen gibt Ruete folgende Werte in Millimetern, wobei die x vom Mittelpunkt des Auges horizontal nach außen, die y nach hinten, die z senkrecht nach oben gehen.

	Ansätze			Ursprünge		
	x	y	z	x	y	z
Rectus superior	+ 2,00	− 5,667	+ 10	− 10,67	+ 32	+ 4
„ inferior	+ 2,20	− 5,767	− 10	− 10,8	+ 32	− 4
„ externus	+ 10,80	− 5,00	0	− 5,4	+ 32	0
„ internus	− 9,90	− 6,00	0	− 14,67	+ 32	0
Tendo obliqui superioris .	+ 2,00	+ 3,00	+ 11	− 14,1	− 10	+ 12
Obliquus inferior	+ 8,00	+ 6,00	0	− 8,1	− 6	− 15

Durchmesser des Auges = 24 mm.

[1] Ruete, Ein neues Ophthalmotrop. Leipzig 1857.

Die Angaben von A. FICK sind folgende:

	Ansätze			Ursprünge		
	x	y	z	x	y	z
Rectus superior	0	− 7,9	+ 9,1	− 16	+ 31	+ 6,5
„ inferior	0	− 7,9	− 9,1	− 17	+ 30	+ 2
„ externus	+ 9,1	− 7,9	0	− 15	+ 31	+ 2
„ internus	− 9,1	− 7,9	0	− 18	+ 30	+ 4
Obliquus superior	+ 4,6	+ 2,7	+ 9,9	− 19,6	− 10,9	+ 12,8
„ inferior	+ 10,4	+ 6,0	0	− 18	+ 30 (?)	+ 6
Sehnerveneintritt	− 3,4	+ 11,5	0			
Scheitel der Cornea . . .	0	− 12	0			

Die Werte von y und z für den Ursprung des *Obliquus inferior* müssen, wie RUETE schon bemerkt hat, fehlerhaft sein; beide sind nämlich jedenfalls negativ.

Die Lage der Drehungsachsen hat RUETE aus seinen Koordinatenmessungen berechnet und gibt folgende Werte für die Winkel a, b, c, welche die (nach unserer Bezeichnung negative) Drehungshalbachse mit den Richtungen beziehlich der positiven x, y und z macht:

	a	b	c
R. internus	90°	90°	180°
R. externus	90°	90°	0°
R. superior	161½°	109½°	90°
R. inferior	19°	71°	90°
Obl. superior	51°	141°	84½°
Obl. inferior	127°	37°	90°

Wie die Drehungen um verschiedene Achsenpaare sich zusammensetzen, ist oben erörtert worden; da die Anschauung dieser Verhältnisse schwer übersichtlich zu machen ist, hat RUETE[1] zuerst unter dem Namen Ophthalmotrop ein drehbares Modell der beiden Augen konstruiert, an welchem die Muskeln durch entsprechend gezogene Fäden dargestellt sind, die durch Federn gespannt werden, und deren Verschiebungen man an einer Skale ablesen kann. Zur Versinnlichung der Vorgänge wird in der Regel die von KNAPP* vereinfachte Form des Instruments genügen, welche in Fig. 15 dargestellt ist. Die beiden künstlichen Augäpfel sind mittels eines Kugelgelenks um ihren Mittelpunkt drehbar; der Äquator, die Hornhaut, der vertikale und horizontale Meridian sind auf ihnen angegeben, und starke seidene Fäden verschiedener Farbe an denjenigen Stellen befestigt, wo sich die Muskeln am Augapfel befestigen. Damit die Fäden die Richtung der Muskeln erhalten, sind vier von ihnen, welche den vier geraden Augenmuskeln entsprechen, durch vier nahe neben einander liegende Löcher des Brettchens A gezogen, und hängen hinter dem Brettchen

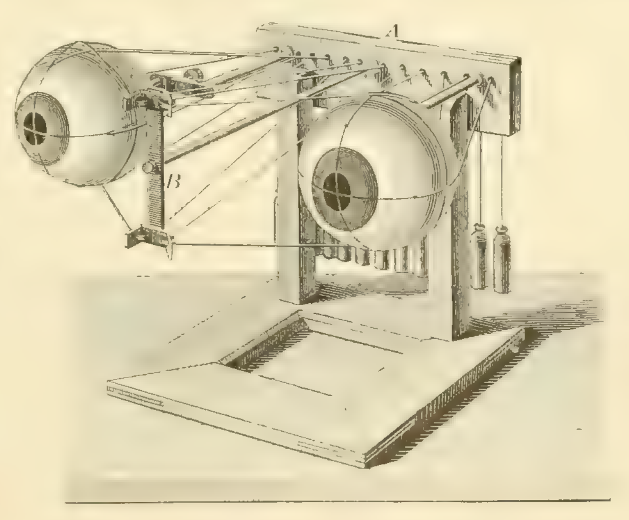


Fig. 15.

[1] Ein neues Ophthalmotrop, Leipzig 1857. — Das Ophthalmotrop, dessen Bau und Gebrauch. Göttingen 1845, aus dem ersten Bande der Göttinger Studien.

Über später ausgeführte Messungen vgl. Anm. 12. K.

durch Gewichte ausgespannt herab. Zwei von den Fäden aber, die den beiden schiefen Augenmuskeln an jedem Auge entsprechen, sind über die kleinen Rollen am oberen und unteren Ende des vertikalen Messingbalkens *B* gezogen und dann um die Rollen herum nach der Mitte des Brettchens *A* geleitet, wo sie ebenfalls durch Löcher gehen und durch Gewichtchen gespannt sind. Die gleichnamigen Muskeln beider Augen sind durch gleichfarbige Fäden dargestellt. Macht man nun mit einem oder beiden Augäpfeln eine beliebige Drehung, so werden diejenigen Fäden angezogen, welche Muskeln entsprechen, die bei der betreffenden Bewegung des Auges gedehnt werden, und also der Bewegung widerstehen würden. Umgekehrt werden diejenigen Fäden nachlassen und ihre Gewichte sinken, deren entsprechende Muskeln am Auge sich bei den betreffenden Bewegungen verkürzen, und die also imstande sind, die Bewegung hervorzubringen oder zu unterstützen. Indem man also darauf achtet, welche Gewichte und um wieviel sie herabsteigen, kann man unmittelbar sehen, welche Muskeln und mit welcher Intensität etwa in Tätigkeit versetzt werden müssen, um die betreffende Bewegung hervorzubringen. Für Demonstrationen und namentlich um schnell eine Übersicht über die oft sehr verwickelten Verhältnisse der pathologischen Abweichungen zu gewinnen, ist der Apparat sehr geeignet.

Ein anderes Ophthalmotrop hat WUNDT[1] konstruiert, an welchem die Fäden mit Spiralfedern verbunden sind, deren Kraft und Länge denen der Augenmuskeln möglichst proportional gemacht worden sind, und an welchem der Augapfel von selbst die den Versuchen von WUNDT über die Augenstellungen entsprechende Richtung annimmt, wenn seine der Blicklinie entsprechende Achse in die verlangte Stellung übergeführt wird. WUNDT hat dies Modell namentlich zur Erläuterung seines Prinzips von der geringsten Anstrengung benutzt, aus welchem er das Gesetz der Augenbewegungen herleitete*.

Die ersten Untersuchungen über Bewegung der Augen bezogen sich auf die Lage des Drehpunkts. JOH. MÜLLER[2] meinte noch, daß der Drehpunkt des Auges in der Mitte seiner Hinterfläche liegen müßte, eine Meinung, die auch von TOURTUAL[3] und SZOKALSKI[4] verteidigt wurde. VOLKMANN[5] suchte mittels seines Gesichtswinkelmessers den Kreuzungspunkt der Richtungslinien zu ermitteln und den Drehpunkt, wie oben S. 98, Bd. I (98, Bd. I) schon auseinandergesetzt ist, zu bestimmen; er glaubte, daß beide Punkte zusammenfielen; der Punkt, den er bestimmte, war in Wirklichkeit wohl der Drehpunkt, der nach ihm 5,6‴ hinter der Hornhaut liegen sollte. Der daran sich knüpfende Streit mit MILE, KNOCHENHAUER, STAMM und BUROW ist ebenfalls schon oben erwähnt. Der letztere machte genauere Bestimmungen des Drehpunktes[6]. Für den Abstand dieses Punktes von der Hornhaut fand er im Mittel von 40 Beobachtungen 5,42‴ mit einer größten Abweichung von 0,8‴. VALENTIN[7] wiederholte diese Versuche, sowohl für horizontale, als für vertikale Bewegungen, und fand im ersten Fall im Mittel 5.501‴, im letzteren 5,08‴. Sehr viel später folgten die oben erwähnten Untersuchungen von JUNGE (in russischer Sprache veröffentlicht) und von DONDERS und D. DOIJER[8].

Auch die Untersuchungen über die Raddrehung hat JOH. MÜLLER begonnen[9]. Er sagt, daß er mittels verschiedener Punkte auf dem Augapfel, die er mit Tinte

---

[1] Archiv für Ophthalmologie. VIII, 2. S. 88.
[2] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826. S. 254.
[3] MÜLLERS Archiv 1840. S. XXIX.
[4] *C. R.* 1843.
[5] Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. 1836. S. 33.
[6] Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. 1842.
[7] Lehrbuch der Physiologie des Menschen Bd. II. 1844.
[8] Archiv für die Holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde. 1863. III, S. 560.
[9] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. 1826. S. 254.

---

* Über weitere Demonstrationsapparate s. Anm. 13. K.

auf dem Weißen desselben bezeichnet hatte, habe erkennen können, daß das Auge während seiner Bewegungen nicht um seine Längsachse gedreht werde. Diese Meinung blieb die herrschende unter den Physiologen, bis eine Arbeit von HUECK[1] den Anstoß zu vielen Untersuchungen gab. HUECK versuchte eine schon von HUNTER geäußerte Meinung zu verteidigen, nämlich daß bei der Neigung des Kopfes nach der Schulter eine entgegengesetzte Drehung des Auges um die Gesichtsachse stattfinden sollte. Diese Drehung schreibt er den schrägen Augenmuskeln zu. Er meinte sich von der Richtigkeit seiner Behauptung überzeugt zu haben, indem er sowohl bei sich selbst wie bei anderen die Verschiebungen der Konjunktivalgefäße bei Bewegungen des Kopfes beobachtete.

Die von HUECK aufgestellten Behauptungen wurden von den meisten Physiologen als richtig angenommen. Obgleich TOURTUAL[2] mit Recht bemerkte, daß die Achsendrehung für die Funktionen des Gesichts durchaus nicht notwendig sei, und obgleich RITTERICH und RUETE Widerspruch gegen die Tatsache erhoben, so wurde die Meinung von HUECK doch von TOURTUAL, BUROW[3], VALENTIN[4], KRAUSE[5] und VOLKMANN[6] verteidigt. TOURTUAL selbst überzeugte sich schon, indem er die Stellung des blinden Flecks untersuchte, daß die scheinbare Drehung des Auges im Kopfe wenigstens nicht zureiche, um die Orientierung der Meridiane des Auges ganz unverändert zu lassen. RUETE[7] bewies mittels der Nachbilder, daß eine Drehung des Auges bei Neigungen des Kopfes und unveränderter Stellung des Auges im Kopfe überhaupt nicht eintrete. DONDERS[8] benutzte diesen Gedanken von RUETE zu einer eingehenderen Prüfung des Gegenstandes. Er wies zunächst nach, wodurch HUECK bei seinen Beobachtungen getäuscht worden war; daß er nämlich nicht hinreichend darauf geachtet hatte, die Stellung des Auges im Kopfe unverändert zu erhalten, während er die Stellung des Kopfes selbst änderte, und daß die von ihm beobachteten Drehungen von dem ersteren, nicht vom letzteren Umstande abhingen. Er fand ferner, daß die Nachbilder vertikaler Objekte bei rein horizontalen und rein vertikalen Bewegungen der Augen parallel bleiben, aber bei schräg seitlich gerichteten Hebungen und Senkungen sich schräg stellen. Ein bestimmtes Gesetz für die Größe dieser Schiefstellung hat er nicht aufgestellt.

Ein solches Gesetz war indessen von LISTING[9] aufgestellt worden, und zwar dasjenige, welches für die meisten normalsichtigen Augen in der Tat sehr genau zuzutreffen scheint. Er hat aber keinen Beweis dafür gegeben und es nicht einmal selbst veröffentlicht. MEISSNER[10] unterwarf dieses Gesetz zuerst einer empirischen Prüfung mittels der Methode der Doppelbilder und fand es im wesentlichen durch seine Versuche bestätigt; er suchte die Bedeutung des LISTINGschen Gesetzes daraus herzuleiten, das dasselbe den größten Horopter gebe, ein Punkt, der weiter unten zu besprechen ist.

Nach einer anderen Erklärung des Raddrehungsgesetzes suchten FICK[11] und WUNDT[12], die auf das LISTINGsche Gesetz weiter keine Rücksicht genommen haben

---

[1] Beiträge zur Physiologie des Auges S. 8.

[2] Repertorium 1842. S. 407. Lehrbuch der Physiologie II, S. 332.

[3] Handbuch der Anatomie 1843. S. 550.

[4] Artikel: Sehen in WAGNERS Handwörterbuch S. 273.

[5] Lehrbuch der Ophthalmologie. S. 14. Das Ophthalmotrop 1846. S. 9.

[6] Nederlandsch Lancet. August 1846. Holländische Beiträge zu den anat. und physiol. Wissenschaften 1848. I, S.105—145; 384—386.

[7] RUETE, Lehrbuch der Ophthalmologie. Ein neues Ophthalmotrop 1857.

[8] Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1851. Archiv für Ophthalmologie II. 1855.

[9] MOLESCHOTT, Untersuchungen Bd. V. S. 193. Zeitschrift für rationelle Medizin 1854. IV, S. 801.

[10] GRAEFES Archiv für Ophthalmologie VIII. 1862. S. 1—114.

[11] Die Achsendrehung des Auges. 1838.

[12] MÜLLERS Archiv 1840 S. LV und LIX; 1846. S. 346.

und von denen der erstere mittels des blinden Flecks, der letztere durch Nachbilder die Stellungen seines Auges bestimmte. Sie waren der Ansicht, daß der Augapfel denjenigen Grad der Raddrehung annehme, der es erlaube, die verlangte Richtung der Gesichtslinie mit der kleinsten Muskelanstrengung herzustellen. Dieser Satz ist höchstwahrscheinlich richtig, obgleich unsere Kenntnis der Bedingungen, von denen die Muskelanstrengung abhängt, noch nicht genügt, die Berechnung auf sicheren Grundlagen durchzuführen. WUNDT hat auch eine Art Ophthalmotrop, ein Modell des um einen Punkt drehbaren Auges hergestellt, an welchem die Augenmuskeln durch Messingfedern von entsprechender Länge und Stärke ersetzt waren, und an dem die Drehungen des Augapfels für die verschiedenen Lagen der Gesichtslinie den Beobachtungen von WUNDT an seinen eigenen Augen ziemlich gut entsprechend eintreten.

In Anbetracht des Umstandes aber, daß die Stärke der Muskeln selbst während des individuellen Lebens den von ihnen verlangten Leistungen sich anpaßt, schien mir dies Prinzip, selbst wenn es sich als faktisch richtig bewähren sollte, nicht den eigentlichen letzten Grund des Gesetzes enthalten zu können. Ich fand bei der Prüfung des LISTINGschen Gesetzes mit Hilfe von Nachbildern dieses für meine eigenen Augen und für die einiger anderer normalsichtiger Beobachter mit großer Genauigkeit zutreffend; dasselbe bestätigte die Prüfung mit Doppelbildern für mein eigenes Auge. Ich suchte die Methode namentlich so zu verändern, daß die Stellung des Kopfes besser gesichert war, und daß Ermüdung der Muskeln durch Winkelmessungen in seitlichen Stellungen des Auges vermieden wurde, und suchte den Grund des Gesetzes in dem oben gegebenen Prinzipe der leichtesten Orientierung[1]. Einwände gegen die Methode der Beobachtung und gegen die Begründung des Gesetzes, welche E. HERING[2] aufstellte, habe ich oben zu beseitigen gesucht. Die oben mitgeteilten Angaben von VOLKMANN rühren zum großen Teil aus noch ungedruckten brieflichen Mitteilungen her*.

1826. JOH. MÜLLER, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 254.
1836. VOLKMANN, Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. S. 33.
1838. HUECK, Die Achsendrehung des Auges. Dorpat.
1840. TOURTUAL, MÜLLERS Archiv für Anatomie und Physiologie, 1840, im Jahresbericht. S. XXIX; LV; LIX.
1842. BUROW, Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin.
1842. VALENTIN, Repertorium 1842. S. 407.
— C. F. KRAUSE, Handbuch der menschlichen Anatomie. S. 550.
1843. SZOKALSKI in *C. R.* 1843.
1844. VALENTIN, Lehrbuch der Physiologie des Menschen. II, 332.
1846. TOURTUAL in MÜLLERS Archiv für Anat. und Physiol. 1846. S. 346.
— RUETE, Lehrbuch der Ophthalmologie, S. 14. Das Ophthalmotrop, S. 9. Göttingen.
— F. C. DONDERS in Nederlandsch Lancet. August 1846.
— VOLKMANN, Artikel „Sehen“ in WAGNERS Handwörterbuch der Physiologie. II, 337—358; 281—290.
1847. F. C. DONDERS, Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges, in den Holländischen Beiträgen zu den anat. und physiol. Wissenschaften. I, 104—145; 384—386.
1854. G. MEISSNER, Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig.
— CZERMAK, Über Abhängigkeit der Akkommodation und Konvergenz. Wiener Ber. XII, 337—358; XV, 438—454.
— A. FICK, Die Bewegungen des menschlichen Augapfels, in Zeitschrift für rationelle Medizin. IV, 801.

[1] Archiv für Ophthalmologie. IX. S. 153—214.
[2] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864. S. 248—286.

* Über einige weitere die Verhältnisse der Augenbewegungen betr. Ermittelungen s. Anm. 14. K.

1855. G. Meissner, Die Bewegungen des Auges, im Archiv für Ophthalmologie. II, 1—123.
1857. Ruete, Ein neues Ophthalmotrop. Leipzig.
1858. A. Fick, Neue Versuche über die Augenstellungen, in Moleschotts Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen. V, 193.
1859. G. Meissner, Über die Bewegungen des Auges, nach neuen Versuchen. Zeitschrift für rationelle Medizin. VIII, 1.
— J. v. Recklinghausen, Netzhautfunktionen, Archiv für Ophthalmologie. V, 2. S. 127.
— W. Wundt, Über die Bewegungen des Auges, Verhandl. des naturhist.-medizin. Vereins zu Heidelberg.
1862. W. Wundt, Über die Bewegungen der Augen, Archiv für Ophthalmologie. VIII, 2. S. 1—87.
— Derselbe, Beschreibung eines künstlichen Augenmuskelsystems zur Untersuchung der Bewegungsgesetze des menschlichen Auges. Ebenda VIII, 2. S. 88—114.
— F. C. Donders und D. Doijer, Die Lage des Drehpunktes des Auges, Archiv für die Holländischen Beiträge. III, 560.
1863. H. Helmholtz, Über die normalen Bewegungen des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalmologie. IX, 2. S. 153—214.
— E. Hering, Beiträge zur Physiologie. 3. und 4. Heft. Leipzig (Kritisches gegen Meissner und Helmholtz).
— J. B. Schuurman, Vergelijkend Onderzoek. der Beweging van het Oog bij Emmetropie en Ametropie, Dissert. Utrecht.
1864. Giraud Teulon in *C. R.* LVIII, S. 361 (über Drehpunkt).
Außerdem Meissners Jahresberichte über die Fortschritte der Physiologie in der Zeitschrift für rationelle Medizin von 1856 ab.

Zusätze von v. Kries.

1. Wiewohl die Bewegungen des Auges in erster Annäherung mit Drehungen um einen festen Punkt verglichen werden können, so sind doch auch Abweichungen von dieser Form vielfach konstatiert und untersucht worden. Die einfachsten Fälle dieser Art sind rein translatorische Bewegungen, die ganz ohne Drehung erfolgen. Von solchen sind insbesondere Vor- und Rückwärtsbewegungen des ganzen Bulbus bekannt und wiederholt untersucht worden; angestrengte Erweiterung der Lidspalte (Zurückziehung des Levator palpebrae sup.) kann nach den Befunden von J. J. Müller[1] ein Vertreten des Hornhautscheitels um Werte bis zu 1 mm bewirken, während der Bulbus bei Verengerung der Lidspalte etwas zurücktritt (Donders[2]).

Eingehende Untersuchungen über diese Bewegungen sind insbesondere von Tuyl[3] angestellt worden (mit graphischer Registrierung der Bewegungen des Hornhautscheitels). Er beobachtete bei Erweiterung der Lidspalte Vorbewegungen im Betrage bis 0,8 mm. Auch sah er u. a. periodische, der Atmung synchrone Verschiebungen, deren Umfang jedoch nur 2—3 hundertstel mm betrug. Weitere hierher gehörige Untersuchungen wurden auch von Peschel[4] und Ludwig[5] angestellt.

Außer rein translatorischen sind sodann als Bewegungen, die nicht um einen Drehpunkt erfolgen, diejenigen zu bezeichnen, bei denen mit der Drehung

[1] J. J. Müller, Archiv f. Ophthalm. XIV. 1868. S. 105.
[2] Donders, ebenda XVII. S. 99. 1871.
[3] Tuyl, Archiv f. Ophthalm. LII. 1901. S. 233.
[4] M. Peschel, Zentralblatt für Augenheilkunde 1904. S. 11.
[5] A. Ludwig, Zur Demonstration des Hervortretens des Bulbus bei willkürlicher Erweiterung der Lidspalte. Klinische Monatsblätter f. Augenheilkunde 1903. S. 389.

um eine Achse zugleich eine Verschiebung dieser parallel stattfindet. Von dieser Art sind die Bewegungen, die Berlin[1] beobachtet hat. Dieser verfuhr so, daß z. B. ein horizontaler Faden vor dem Auge ausgespannt wurde; hinter dessen, dem Auge direkt gegenüber gelegener Mitte in gewissen Abständen rechts und links wurden drei kleine Spiegelchen so angebracht, daß ihre Zerstreuungsbilder von dem Faden halbiert wurden, wenn das Auge die Mitte desselben fixierte (was etwa bei Primärstellung des Auges der Fall war). Wurde nun das Auge nach rechts oder links gewendet, so hätte, wenn es sich um eine senkrechte Achse gedreht hätte, die nunmehr fixierte Stelle des Fadens wiederum das Zerstreuungsbild des seitlich gelegenen Spiegelbildes halbieren müssen. Dies war aber im allgemeinen nicht der Fall. Ähnliche Abweichungen fanden sich bei senkrechter und schräger Anordnung des Fadens und entsprechenden Blickbewegungen. Die Art der gefundenen Abweichungen wird durch die nachstehende Figur 16 veranschaulicht.

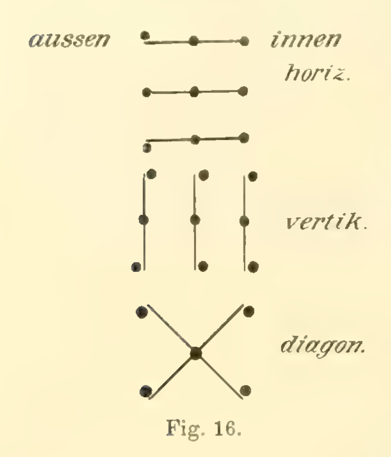


Fig. 16.

Die Beobachtungen lehren, daß z. B. bei der Wendung des Blicks nach rechts oder links der Kreuzungspunkt der Visierlinie etwas herauf- oder herunterrückt. Dies könnte nun zunächst zwar auch durch Drehungen bewirkt werden, wenn diese um eine nicht genau vertikale Achse stattfänden. Doch überzeugt man sich leicht, daß dies nur möglich ist, wenn zugleich die Achse eine absolute Lage im Raum hätte, die durch die sonstigen Bewegungsverhältnisse sicher ausgeschlossen ist. Es ist also nicht zu bezweifeln, daß hier in der Tat die Bewegungen von der allgemeinen Art der Schraubenform sind, d. h. die Drehung um eine Achse mit einer Verschiebung parallel der Achse verbunden ist.

2. Volkmann[2] und nach ihm Woinow[3] suchten zunächst die Frage zu entscheiden, ob die Bewegungen des Auges überhaupt Drehungen um einen festen Mittelpunkt sind, und zwar stellten sie sich die Aufgabe zu prüfen, ob bei Bewegungen des Blicks von endlichem Betrage in gleicher Richtung die Drehung dauernd um denselben Drehpunkt erfolgt. Ihre Versuche gingen von dem gleichen Prinzip, der Ermittlung von Visierlinien aus.

Volkmann ordnete auf den Peripherien zweier konzentrischer Kreise eine größere Anzahl von Nadeln derart an, daß je eine dem inneren und eine dem äußeren angehörige auf demselben Radius lagen, somit die Verbindungslinien aller Nadelpaare sich in einem Punkte, eben dem Mittelpunkt beider Kreise, schnitten. Er prüfte nun, ob es möglich wäre den Kopf an eine solche Stelle zu bringen, daß, wenn das Auge successive die verschiedenen Nadeln fixierte, überall die inneren genau vor den äußeren zu stehen schienen, also die sämtlichen Hauptvisierlinien mit den Radien des Kreises zusammenfielen. Es ergab sich, daß stets eine Stellung erzielt werden konnte, die dieser Anforderung mit größter Annäherung entsprach, woraus Volkmann die Drehung des Auges um einen festen Punkt schließen zu dürfen glaubte.

[1] Berlin, Archiv f. Ophthalm. XVII, 1871. 2. S. 193.
[2] Volkmann, Berichte der k. sächs. Ges. d. Wissensch. math.-phys. Kl. 1869. S. 28.
[3] Woinow, Archiv f. Ophthalm. XVI. 1. 1870. S. 247.

Woinow benutzte (unter Anleitung von Helmholtz) ein ähnliches Verfahren, bei dem die Teilstriche von Maßstäben verwendet wurden, und gelangte zu dem gleichen Ergebnis.

Streng genommen zeigen die Beobachtungen, wie Berlin mit Recht hervorgehoben hat, nur, daß die sämtlichen Lagen der Hauptvisierlinien sich in einem Punkte schneiden, während der Schluß, daß dieses der konstante Drehpunkt des Auges sei, nicht ohne weiteres gerechtfertigt ist. Man ersieht dies am einfachsten, wenn man zunächst nur zwei Lagen derselben als Anfangs- und Endlagen für eine bestimmte endliche Drehung ins Auge faßt.

Sind ab und $a'b'$ (Fig. 17) die Lage einer Linie vor und nach einer Drehung und c der Punkt, an dem diese beiden sich schneiden, so kann die Linie von der ersten in die zweite Lage durch Drehung um eine durch c gehende Achse gebracht werden, aber nicht minder auch durch Drehung um sehr zahlreiche andere Punkte. In der Tat wird c nur dann der Drehpunkt sein, wenn der ursprünglich in c befindliche Punkt der Geraden an dieser Stelle geblieben ist. Nehmen wir an, es sei der ursprünglich in c liegende Punkt nach der Drehung an dem der Linie $a'b'$ angehörige Punkt c', so finden wir den Ort der Achse, indem wir auf der Mitte von cc' ein Lot errichten und auf dieser einen Punkt D suchen, der durch die Bestimmung festgelegt ist, daß der Winkel cDc' gleich demjenigen ist, um den die Linie ihre Richtung verändert hat, also $= bcb'$.

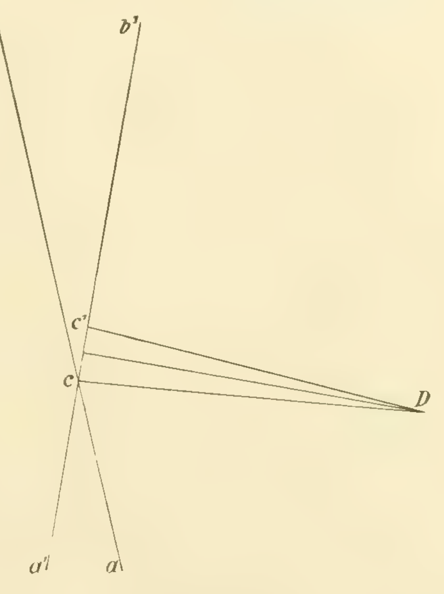


Fig. 17.

In einem solchen Falle nun, wo wir eine Drehung von endlichem Betrage um denselben Punkt ausgeführt denken, würde der Schnittpunkt der verschiedenen Lagen der Hauptvisierlinie vorübergehend ein anderer sein. Soll der Schnittpunkt dauernd an einer bestimmten Stelle verharren, so müssen wir eine analoge Betrachtung für unendlich kleine Drehungen anstellen; und es ergibt sich leicht, daß der Drehpunkt jederzeit auf derjenigen Linie liegen muß, die in dem betreffenden Punkte auf der jeweiligen Lage der Hauptvisierlinie senkrecht steht, aber an beliebigen Punkten dieser Linie liegen kann. Eine solche Lage der Drehpunkte beweisen streng genommen die Versuche von Volkmann und Woinow.

Der von ihnen gezogene Schluß, daß der gefundene Punkt der Drehpunkt des Auges sei, ist gerechtfertigt nur wenn man von der Voraussetzung ausgeht, daß der Drehpunkt jederzeit in der Hauptvisierlinie gelegen sei.

Daß die Beobachtungen von Volkmann und Woinow nicht ohne weiteres den Drehpunkt des Auges anzugeben gestatten, ist auch von Hering[1] hervorgehoben worden, mit dessen Bemerkungen das oben Gesagte sich inhaltlich deckt. Da jedoch Hering dabei von einer wesentlich anderen Betrachtungsweise der Augen-

[1] E. Hering, Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges in Hermanns Handbuch der Physiologie Bd. III. S. 457.

bewegungen überhaupt ausgeht (einer Betrachtungsweise, die z. B. auch ZOTH[1] sich angeeignet hat), so wird es schon zur Vermeidung von Mißverständnissen nützlich sein, wenn ich auf diese Darstellungsweise hier kurz eingehe. Die Beobachtungen von VOLKMANN und WOINOW zeigen nach HERING wohl, daß das Auge sich um einen im Raume (in der Orbita) festen Punkt (eben den als Schnittpunkt der Visierlinien ermittelten) drehen, nicht aber daß dieser Punkt ein zugleich im Auge fester sei. Die Bezeichnung einer Bewegung als Drehung um einen zwar im Raume, nicht aber im Auge festen Punkt erscheint auf den ersten Blick einigermaßen verwirrend, insbesondere wenn man an die in der Mechanik üblichen Bezeichnungs- und Darstellungsweisen gewöhnt ist. Dieser zufolge ist der Drehpunkt ein Punkt, sei es des Auges selbst, sei es seiner ideellen Erweiterung, der bei der Bewegung an seiner Stelle bleibt; und es erscheint danach nicht verständlich, was ein im Raume fester, aber im Auge sich verschiebender Drehpunkt bedeuten soll.

Was nun mit der Drehung um einen zwar im Raume, nicht aber im Auge festen Punkt gemeint sei, wird wohl am einfachsten ersichtlich, wenn wir bestimmte mechanische Verhältnisse in Betracht ziehen, die eine solche Auffassung nahe legen. So können wir uns eine ebene Metallscheibe auf einer ebensolchen Unterlage um einen in dieser befestigten Stift drehbar denken; wenn die Scheibe nicht ein Loch, sondern einen linearen Schlitz besitzt, so kann sie sich um den Stift drehen und zugleichder art verschieben, daß der Stift im Schlitz oder der Schlitz an dem Stift entlang gleitet. Sie dreht sich dann um einen im Raume festen Punkt (den Stift), der aber seinen Ort an der Scheibe wechselt, eben weil diese an ihm entlang gleitet. Dies ist auch gerade das, was für die uns beschäftigenden Versuche in Betracht zu ziehen ist; die Visierlinie könnte sich um den als Schnittpunkt ihrer Anfangs- und Endlagen ermittelten Punkt drehen, zugleich aber in ihrer Richtung um irgend einen Betrag vor- oder rückwärts gleiten.

Eine Bewegung dieser Art stellt sich nun, wie oben schon gezeigt, rein geometrisch betrachtet, einfach als Drehung um eine andere Achse dar, die (gleichfalls zur Ebene der Scheibe senkrecht) durch einen bestimmten anderen Punkt geht. Die Drehung um einen zwar im Raum, nicht aber im Auge festen Punkt oder die Kombination einer Dreh- und einer normal zur Achse gerichteten Gleitbewegung ist nichts anderes als Drehung um eine andere, der in Betracht gezogenen parallele Achse.

Es muß ferner betont werden, daß wenn wir neben der Drehbewegung noch beliebige Parallelverschiebungen senkrecht zur Achsenrichtung in Betracht ziehen, wir uns die Achse der Drehung durch jeden beliebigen Punkt gehend, und die Drehung in der mannigfaltigsten Weise in Drehungen und Gleitbewegungen zerlegt denken können und daß daher diese Betrachtung zunächst etwas Willkürliches enthält. Ein bestimmter Anhalt für sie ergibt sich nur, wenn wir, sei es über die Lage der Achse oder über die Richtung der Parallelverschiebung, eine einschränkende Festsetzung treffen, so z. B. die (von der in der HERINGschen Betrachtung stillschweigend ausgegangen wird), daß als Parallelverschiebung eine Bewegung in der jeweiligen Richtung der Hauptvisierlinie in Betracht gezogen wird.

Es ist demgemäß auch nicht zutreffend, wenn wir als Ergebnis der VOLKMANNschen Versuche angeben, daß sie die Drehung um einen im Raume (in der Orbita), nicht aber um einen im Auge festen Punkt dartun. In dieser Form würde sich die Bewegung immer auffassen lassen, auch wenn die Hauptvisierlinien keinen unveränderlichen Schnittpunkt aufwiesen. Vielmehr müssen wir hinzufügen, daß die Beobachtungen einen im Raume festen Drehpunkt dann ergeben, wenn festgesetzt wird, daß neben der Drehung nur Verschiebungen in der Richtung der Hauptvisierlinie in Betracht gezogen, die Drehung also in dieser ganz bestimmten Weise zerlegt gedacht werden soll.

Man übersieht hiernach die gleiche Bedeutung der in der einen oder der anderen Form an die VOLKMANNschen Versuche geknüpften Überlegung. Derjenige Punkt, der sich als Schnittpunkt der Anfangs- und Endlage der Hauptvisierlinie ergibt, kann

[1] ZOTH, Die Gesichtswahrnehmungen in NAGELS Handbuch der Physiologie. III. S. 294.

als Drehpunkt des Auges nicht ohne weiteres in Anspruch genommen werden, da (wie wir es ausdrückten) die Achse nicht durch die Hauptvisierlinie zu gehen braucht, oder (wie es HERING ausdrückt) mit der Drehung um einen Punkt der Hauptvisierlinie eine Gleitbewegung verbunden sein kann, bei der diese sich in sich selbst verschiebt, d. h. die Drehung um einen wohl im Raume, nicht aber im Auge festen Punkt stattfinden kann.

Wie schon bemerkt, hat die Bezeichnungsweise einer Bewegung (als Drehung um einen zwar im Raume, nicht aber im Auge festen Punkt) auf den ersten Blick, namentlich für den, der an die übliche Darstellung der Bewegungen in der Mechanik gewöhnt ist, etwas Befremdendes. Ich habe aus diesem Grund die obige Darstellung bevorzugt, die sich dem in der theoretischen Mechanik gebräuchlichen anschließt. Es soll übrigens nicht bestritten werden, daß die HERINGsche Betrachtungsweise unter gewissen Umständen Vorzüge besitzen kann; es kann dies namentlich der Fall sein für die Betrachtung fortgesetzter Drehungen in demselben Sinne, die gerade bei dieser Betrachtung eine bei der sonst üblichen nicht hervortretende Einheitlichkeit darbieten können. Wenn z. B. der Bulbus sich (in der HERINGschen Bezeichnungsweise) um einen im Raume festen Punkt dreht, dabei aber irgendwelche Verschiebungen der Visierlinie längs ihrer jeweiligen Richtung stattfinden, so würde eine solche Bewegung bei der anderen Betrachtungsweise als Drehung um fortgesetzt wechselnde Achsen zu bezeichnen sein, wobei also die ihr in gewissem Sinne zukommende Einheitlichkeit nicht hervortreten würde.

Die hier ohne einen strengen Beweis gemachte Voraussetzung suchte BERLIN[1] direkt zu prüfen, bzw. zu beweisen, indem er bei einem im übrigen der WOINOWschen Methode sich anschließenden Verfahren außer den beiden die Hauptvisierlinie bestimmenden Objekten noch zwei exzentrisch gesehene benützte. Diese wurden so angeordnet, daß sie direkt hintereinander erschienen, so daß nun zwei Visierlinien erhalten und somit auch der Kreuzungspunkt der Visierlinien festgelegt wurde. Wenigstens für das eine Auge zeigte es sich, daß dieser in konstanten Abständen von demjenigen Punkte lag, in dem sich die verschiedenen Lagen der Hauptvisierlinien schnitten, woraus sich dieser dann in der Tat als Drehpunkt ergibt, während für das andere Auge allerdings kleine Abweichungen bemerkt wurden. Hier berechnete sich eine Lage des Drehpunktes außerhalb der Visierlinien (0,541 mm medialwärts), wie dies auch nach den anatomischen Verhältnissen (der Lage der Fovea lateral von der Augenachse) erwartet werden kann.

Auch vertikale Drehungen sind nach BERLIN von Vor- und Rückwärtsbewegungen des Auges begleitet, was eine Lage des Drehpunktes über oder unter der Hauptvisierlinie bedeuten würde.

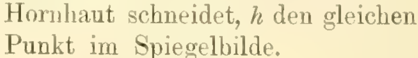
Auch J. J. MÜLLER[2] stellte seinen Versuchen zunächst die Aufgabe, zu entscheiden, ob die Bewegungen des Auges um einen festen Drehpunkt stattfänden, und zwar suchte er zu diesem Zwecke direkt die Bahnlinien zu bestimmen, die der Hornhautscheitel (genauer der Durchschnittspunkt der Hauptvisierlinie mit der Hornhaut) durchläuft, wenn das Auge Drehungen ausführt, bei denen der Blick einer Geraden entlang gleitet. Das von FICK angegebene Verfahren war das folgende.

Es sei in Fig. 18 die Ebene der Zeichnung derjenigen parallel, die durch das Auge und die die Reihe der Fixationspunkte enthaltende Gerade gelegt ist: wir wollen sie als die horizontale voraussetzen. Das beobachtende Auge sei A. Das Auge wird nun zwischen zwei miteinander fest verbundene Spiegel gebracht, die auf jener Ebene senkrecht stehen, und unter 45° gegeneinander geneigt sind. Ihre Durchschnitte mit jener Ebene seien S_1 und S_2.

[1] a. a. O.
[2] a. a. O.

Wie eine einfache Überlegung zeigt, ist das Bild des Auges, das durch successive Spiegelung an beiden Spiegeln entworfen wird, a, genau um 90° zum wirklichen Auge gedreht. Der Beobachter erblickt also sein Auge im Profil. In den beiden Spiegeln sind ferner senkrechte Linien markiert, deren Fußpunkte in der Ebene der Zeichnung M_1 und M_2 sind. Die Aufgabe des Beobachters ist es nun, die Spiegel so zu stellen, daß diese beiden Marken einander decken, und den Hornhautscheitel tangieren.

Sobald dies der Fall ist, muß m, das Bild, das S_2 von M_1 entwirft, in der Linie $HM_2\,h$ liegen, wenn H den Punkt darstellt, wo die Hauptvisierlinie die Hornhaut schneidet, h den gleichen Punkt im Spiegelbilde.



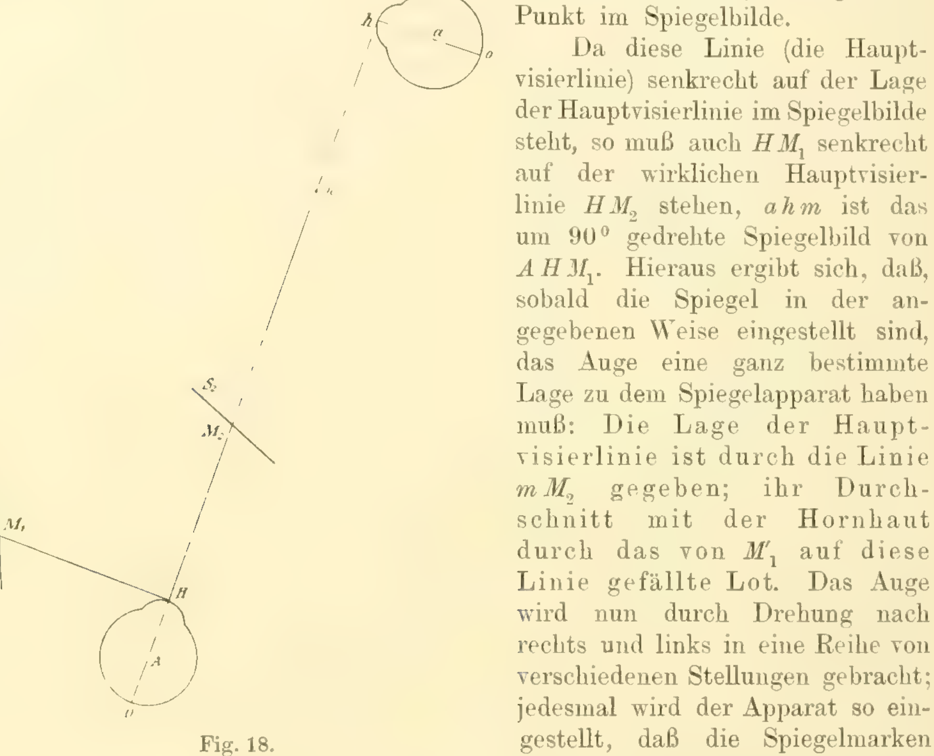
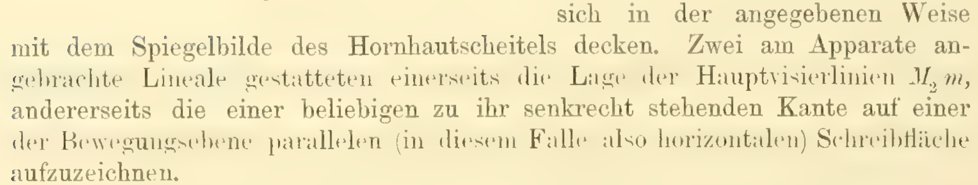


Fig. 18.

Da diese Linie (die Hauptvisierlinie) senkrecht auf der Lage der Hauptvisierlinie im Spiegelbilde steht, so muß auch HM_1 senkrecht auf der wirklichen Hauptvisierlinie HM_2 stehen, ahm ist das um 90° gedrehte Spiegelbild von AHM_1. Hieraus ergibt sich, daß, sobald die Spiegel in der angegebenen Weise eingestellt sind, das Auge eine ganz bestimmte Lage zu dem Spiegelapparat haben muß: Die Lage der Hauptvisierlinie ist durch die Linie mM_2 gegeben; ihr Durchschnitt mit der Hornhaut durch das von M'_1 auf diese Linie gefällte Lot. Das Auge wird nun durch Drehung nach rechts und links in eine Reihe von verschiedenen Stellungen gebracht; jedesmal wird der Apparat so eingestellt, daß die Spiegelmarken sich in der angegebenen Weise mit dem Spiegelbilde des Hornhautscheitels decken. Zwei am Apparate angebrachte Lineale gestatteten einerseits die Lage der Hauptvisierlinien $M_2\,m$, andererseits die einer beliebigen zu ihr senkrecht stehenden Kante auf einer der Bewegungsebene parallelen (in diesem Falle also horizontalen) Schreibfläche aufzuzeichnen.



Der Schnittpunkt ergibt zunächst die Projektion eines bestimmten, in der Hauptvisierlinie gelegenen Punktes auf die Horizontalebene; da ferner der Schnittpunkt der Hauptvisierlinie mit der Hornhaut in einem festen durch die Konstanten des Apparates sich ergebenden Abstande von jenem liegt, so ist auch die Projektion dieses Punktes durch Abtragung jenes Abstandes auf den Hauptvisierlinien zu ermitteln. Auf diese Weise ergeben sich somit die Projektionen der von dem mehrerwähnten Hornhautpunkt successiv eingenommenen Ort auf die Horizontalebene. Das Ergebnis der Versuche war, daß diese mit großer Annäherung in eine Kreislinse fielen.

Was die aus dieser Tatsache zu ziehenden Schlüsse anlangt, so muß man beachten (worauf Hering mit Recht hingewiesen hat), daß die kreisförmige Bahn des hier beobachtenden Punktes (Durchschnitt der Hauptvisierlinie mit dem Hornhautscheitel) für sich allein nicht genügt, um zu beweisen, daß die Drehung dauernd um einen bestimmten Punkt erfolgt sei. Sei in Fig. 18 der Kreis *ab* jene Bahnlinie, so können wir für eine unendlich kleine Drehung, vermöge deren der Punkt *a* sich um ein weniges in der Kreisperipherie verschiebt, behaupten, daß der Drehpunkt irgendwo in einer hier auf der Kreisperipherie senkrecht stehenden Linie liegen muß. Der Drehpunkt muß stets auf dem vom Mittelpunkte *O* des Kreises nach dem jeweiligen Orte unseres Punktes gezogenen Radius, aber er braucht nicht gerade im Mittelpunkte selbst zu liegen; er könnte dafür (rein geometrisch betrachtet) mit jenen Radien und in ihnen beliebig wandern.

Eine Kontrolle, ob der Mittelpunkt der Bahnlinie wirklich Drehpunkt ist, gestatteten die Müllerschen Versuche aber dadurch, daß sie zugleich für jede Stellung des Auges die Lage der Hauptvisierlinie ergaben. Ist *O* der Drehpunkt, so müssen, wie aus Fig. 19 ersichtlich, alle Lagen der Hauptvisierlinie einen kleineren mit der Bahnlinie konzentrischen, um *O* geschlagenen Kreis tangieren. (Fiele der Drehpunkt in die Hauptvisierlinie, so müßten alle ihre Lagen sich in *O* schneiden.) Auch ist, wenn die Lagen der Hauptvisierlinie sich so verhalten, dann in der Tat der Schluß berechtigt, daß der Mittelpunkt der Bahnlinie konstanter Drehpunkt ist.

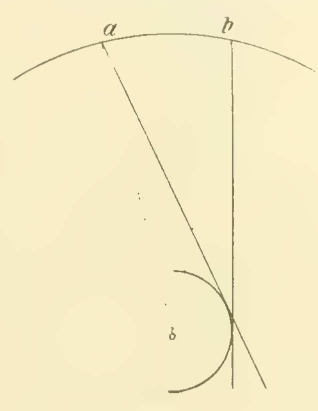


Fig. 19.

Dies dürfte in einem Teile der Müllerschen Versuche der Fall gewesen sein, wo, wie Müller angibt, die Durchschnittspunkte der aufeinanderfolgenden Lagen der Hauptvisierlinien sich „einem kleinen zur Bahnlinie konzentrischen Kreise anschlossen“. Die Verhältnisse waren dabei so, daß (in Übereinstimmung mit der erwähnten Angabe Berlins) der Drehpunkt ein wenig medianwärts von der Hauptvisierlinie lag. Wenn in anderen Fällen alle Lagen der Hauptvisierlinie sich annähernd in einem von jenem Zentrum ein wenig abweichenden Punkte schnitten, so stimmt das mit der Annahme, daß dieses der Drehpunkt sei, nicht in mathematischer Strenge überein. Indessen wird man, bei der der Methode überhaupt zukommenden Genauigkeitsgrenze, wohl auch hier den Schluß ziehen dürfen, daß die Richtungsänderungen der Hauptvisierlinie mit der dem betreffenden Bahnabschnitt zugehörigen Zentriwinkel sehr annähernd übereingestimmt haben, und somit daß der Mittelpunkt der Kreisbahn mit großer Annäherung den Drehpunkt darstellt.

Was nun die absolute Lage des Drehpunktes angeht, so ergab sich diese in den Versuchen J. J. Müllers direkt, und zwar in bezug auf den Hornhautscheitel, in den Versuchen Berlins gleichfalls direkt jedoch in bezug auf den Kreuzungspunkt der Hauptvisierlinien oder die Pupillenmitte, wonach der Abstand vom Hornhautscheitel durch Addierung von 3,2 *Mm* (als Abstand der Pupillarebene vom Hornhautscheitel) berechnet werden konnte.

Für Horizontalbewegungen fand Müller als Gesamtmittel seiner Bestimmungen 14,56 mm (l.) und 13,19 mm (r.).

Berlin 14,41 mm (l.) und 14,66 mm (r.) Abstand vom Hornhautscheitel.

Beide Beobachter bemerkten übrigens übereinstimmend, daß die Lage des Drehpunktes (für horizontale Bewegungen) bei erhobener und gesenkter Blickebene von der bei horizontaler Lage abwich, so zwar, daß der Drehpunkt bei gehobener Blickebene etwas größeren, bei gesenkter etwas kleineren Abstand vom Hornhautscheitel besitzt. Die Verschiebungen belaufen sich jedoch nur auf Bruchteile eines Millimeters, wie die nachstehende Zusammenstellung ersichtlich macht.

		Verschiebung des Drehpunktes bei gehobenem	gesenktem
		Auge	
Müller	l.	− 6,6	+ 0,22
	r.	− 0,1	+ 0,32
Berlin	l.	− 0,4	+ 0,09
	r.	− 0,34	+ 0,47

Den Drehpunkt für vertikale Bewegungen fand Berlin durchschnittlich 1,56 mm weiter nach vorn gelegen als den für horizontale.

Auch Volkmann und Woinow haben außer ihren vorhin erwähnten, nur die Existenz, nicht aber die Lage des Drehpunkts betreffenden Untersuchungen, weitere Versuche zur Feststellung ausgeführt, denen diese letztere Aufgabe gestellt war. Zu dem Ende verfuhr Volkmann so, daß er die Verschiebungen der Pupillenmitte beobachtete, die bei gemessenen Drehungen des Auges stattfinden; auch in diesem Falle wird zunächst der Abstand zwischen Drehpunkt und Pupillarebene gefunden, aus dem dann, ebenso wie bei dem Berlinschen Verfahren, der Abstand vom Hornhautscheitel zu berechnen war. Dagegen sucht Woinow die Verschiebung des Hornhautscheitels zu ermitteln.

Endlich sind noch von Weiss[1] Bestimmungen ausgeführt worden, bei denen ähnlich wie bei dem Verfahren von Junge die Verschiebungen eines Hornhautspiegelbildchens beobachtet wurden.

Eine Übersicht der von den verschiedenen Autoren erhaltenen Ergebnisse gibt die nachstehende Zusammenstellung (nach Zoth):

Entfernung des Drehpunktes des Auges vom Hornhautpole.

Beobachter		Refraktion	Mittelwerte mm	Länge d. Sehachse mm	Bemerkungen
Volkmann .		?	13,61	—	Horizontalbewegung 51 Beob.
			13,37	—	Vertikalbewegung 43 Beob.
			13,45	—	Gesamtmittel (10 Pers.)
Woinow . .	l.	H?	14,1	21,83	Horizontalbewegungen
	r.		14,0	21,83	
J. J. Müller	l.	− 4 D	14,56	—	Horizontalbewegungen. Mittel aus 100 Einzelbestimmungen
	r.		13,19	—	
Berlin . . .	l.	− $^4/_3$ D	14,41	—	
	r.	− 3 D	14,66		Horizontalbewegungen
Weiss . . .		E	12,9	—	
Donders u. Doijer		H	13,22	22,10	
		E	13,45	23,53	Horizontalbewegungen
		M	14,52	25,55	
Mauthner[2]		H	13,01	23,08	
		E	13,73	24,98	Horizontalbewegungen
		M	15,44	27,23	

[1] Weiss, Archiv f. Ophthalm. XXI (2). 1875. S. 132.

[2] Vorlesungen über die optischen Fehler des Auges. 1876. Die hier erwähnten Bestimmungen Mauthners sind nach der Methode von Donders und Doijer ausgeführt.

3. Die hier von HELMHOLTZ eingeführte Bezeichnungsweise ist in gewisser Hinsicht keine ganz glückliche. Es wird nämlich das Wort Raddrehung zunächst in dem Sinne benutzt, daß es eine gewisse Art der Bewegung des Auges bezeichnet. In diesem Sinne hätten wir eine Drehung des Auges um die Blicklinie als Achse eine reine Raddrehung zu nennen, würden aber auch jeder Drehung, deren Achse zur Blicklinie nicht senkrecht steht, sondern mit ihr einen schiefen Winkel einschließt, einen gewissen Betrag an Raddrehung zuzuschreiben haben, während für Drehungen um eine zur Blicklinie senkrechte Achse der Raddrehungsanteil = 0 wäre. Andererseits aber bezeichnet HELMHOLTZ als Raddrehungswinkel einen gewissen, nicht eine Bewegung, sondern eine Stellung des Bulbus charakterisierenden Winkel. Diese Duplizität würde nur dann unbedenklich sein, wenn der Zusammenhang bestände, daß Änderungen des Raddrehungswinkels stets und ausschließlich durch solche Bewegungen herbeigeführt würden, die auch im ersteren Sinne Raddrehungen sind oder eine Raddrehungskomponente enthalten, d. h. um eine zur Blicklinie schiefwinklige Achse stattfinden. Dies ist nun aber nicht der Fall. Vielmehr bringt es die Art, wie der Raddrehungswinkel definiert ist, mit sich, daß sehr vielfach bei Bewegungen, die keine Raddrehungskomponente enthalten, der Raddrehungswinkel sich ändert. Dies ist z. B. immer der Fall, wenn das Auge von der Primärstellung direkt in eine Tertiärstellung übergeht. Hier findet die Drehung um eine frontale Achse statt, die Blicklinie läuft in einer Ebene, der Raddrehungsanteil der Bewegung ist = 0. Gleichwohl erhält der Raddrehungswinkel von Null verschiedene (positive oder negative) Werte. Man kann nicht bestreiten, daß hierin ein Sachverhalt liegt, von dem man auf Grund der Benennung das Gegenteil zu erwarten versucht ist, und daß dieser insofern etwas Irreführendes anhaftet. Sie ist denn auch die Quelle zahlreicher Mißverständnisse geworden; sogar ist gelegentlich die Meinung aufgetaucht, HELMHOLTZ selbst habe sich hier in einem Irrtum bewegt, und sei der fälschlichen Ansicht gewesen, daß die eben erwähnten Bewegungen eine Raddrehungskomponente enthalten. Diese Annahme ist, wie eine aufmerksame Prüfung der HELMHOLTZschen Darstellung lehrt, durchaus unbegründet. Unbestreitbar aber ist, daß in jener Bezeichnungsweise die Gefahr von Mißverständnissen liegt. Zweifellos ist es besser, für die Bezeichnung der Stellung und der Bewegungsweise verschiedene Ausdrücke zu benutzen.

Mit Recht hat daher die von HERING eingeführte Bezeichnungsweise Zustimmung gefunden, derzufolge das Wort Rollung zur Bezeichnung einer Art der Bewegung, das Wort Raddrehung oder besser Raddrehungswinkel ausschließlich zur Bezeichnung einer Stellung benutzt wird. Als reine Rollung ist demnach eine Bewegung um die Blicklinie als Achse zu bezeichnen, während wir jeder Bewegung, die um eine zur Blicklinie schiefwinklige Achse stattfindet, eine gewisse Rollungskomponente zuzuschreiben haben.

Es wird hier der Ort sein, sogleich noch auf gewisse Verschiedenheiten in bezug auf die Betrachtungs- und Darstellungsweise der Augenbewegungen einzugehen, deren Klarlegung mir zur Vermeidung von Mißverständnissen wünschenswert erscheint.

Das in der Mechanik allgemein übliche und auch von HELMHOLTZ durchgängig festgehaltene Darstellungsprinzip ist das, daß eine Drehung durch die Angabe der Achse, um welche sie stattfindet, beschrieben wird. Wie bekannt (und auch vorhin schon erwähnt), kann jede unendlich kleine Bewegung als Drehung um eine bestimmte Achse und Fortbewegung parallel dieser Achse aufgefaßt werden. Sofern das letztere

in Fortfall kommt, ist jede unendlich kleine Drehung des Auges Drehung um eine bestimmte Achse. Bei dieser, wie gesagt, in der Mechanik üblichen Darstellung bedeutet die Achse diejenigen Punkte des Auges (eventuell seiner gedachten Erweiterung), die bei der Bewegung an ihrer Stelle verharren.

Es muß nun bemerkt werden, daß Hering in seiner Darstellung auch hier von einer abweichenden Betrachtung ausgeht und auf diesem Wege zu Darstellungen und Bezeichnungen gelangt, die auf den ersten Blick nicht recht verständlich erscheinen, wenn man von jener anderen Betrachtungsweise ausgeht. Indem er nämlich von vornherein die Bewegungen der Blicklinie heraushebt, gelangt er dazu, jede unendlich kleine Drehung in einer ganz bestimmten Weise zu zerlegen, und zwar so, daß einerseits die Drehung um eine zur Blicklinie senkrechte Achse, andererseits eine Drehung um die Blicklinie selbst (Rollung) als Komponenten auftreten. Es ist selbstverständlich, daß sich jede Drehung in dieser Weise zerlegen läßt, nicht minder auch, daß diese Zerlegung rein geometrisch gesprochen eine willkürliche ist, die allerdings mit Rücksicht auf die ausgezeichnete Bedeutung der Blicklinie angezeigt oder nützlich erscheinen kann.

Während nun aber für unendlich kleine Drehungen es von verhältnismäßig geringem Belang ist, ob wir die eine oder die andere Betrachtung bevorzugen, ergeben sich bedeutungsvollere Unterschiede, wenn wir Drehungen von endlichem Betrage ins Auge fassen. Es sind nämlich ganz verschiedene Dinge, die sich bei der einen und bei der anderen Betrachtung als dauernde Fortsetzung derselben Drehung darstellen. Bei der in der Mechanik üblichen und von Helmholtz angenommenen Darstellung sprechen wir von der gleichen Drehung, wenn das Auge um eine bestimmte Linie, die im obigen Sinne Drehungsachse ist, um einen endlichen Winkelbetrag gedreht wird. Bei solchen dauernd um dieselbe Achse erfolgenden Drehungen läuft die Blicklinie in einer Ebene, wenn die Achse auf ihr senkrecht steht; sie bewegt sich dagegen in einem Kegelmantel (ihr Endpunkt durchläuft auf einer Kugel einen Parallelkreis), wenn sie mit ihr einen schiefen Winkel bildet. Dies ist der Fall z. B. bei der Durchlaufung eines Direktionskreises; und hierbei findet also fortdauernd in gewissem (durch jenen Winkel sich bestimmenden) Betrage Rollung des Auges statt. Der Heringschen Darstellungsweise folgend können wir dagegen von einer fortgesetzten Drehung des Auges um eine Achse dann reden, wenn die Blicklinie sich in einer bestimmten Ebene bewegt, sei es nun, daß dabei zugleich eine Rollung stattfindet oder nicht. Im letzteren Falle spricht Hering von einer Drehung um eine im Raume feste Achse, die jedoch ihre Lage im Auge beständig verändert, eine Bezeichnung, die nur auf dem Boden dieser besonderen Betrachtungsweise berechtigt und verständlich ist, während eine solche Bewegung in der physikalisch üblichen Weise als eine Drehung um beständig wechselnde Achsen aufgefaßt werden würde. — Welche dieser Darstellungsweisen den Vorzug verdient, darf hier unerörtert bleiben, wird auch in gewissem Maße Sache des Geschmackes und der besonderen Anwendungen sein, die man im Auge hat. In der Tat wird es in manchen Fällen berechtigt sein, die fortgesetzte Bewegung des Blicks in derselben Richtung als eine einheitliche Bewegung aufzufassen, so z. B. wenn der Blick an einer seitlich im Gesichtsfeld gelegenen Vertikalen hinauf- und hinabgleitet. Diese Bewegung (wir setzen voraus, daß sie streng nach dem Listingschen Gesetze erfolgt) ist bei der in der Physik üblichen Betrachtung als Drehung um fortdauernd wechselnde Achsen zu bezeichnen; in der Heringschen Darstellung ist sie eine Drehung um eine im Raume feste Achse, die jedoch von Rollungen begleitet ist und deren Lage im Auge sich daher ändert.

Dagegen muß betont werden, daß auch die Heringsche Betrachtungsweise uns nicht der Notwendigkeit überhebt, die Bezeichnung der Bewegungsarten und diejenigen der Stellungen sorgfältig auseinander zu halten. Gerade hierin, wie vorhin schon erwähnt wurde, liegt der Nutzen, den wir von einer Anwendung der beiden Worte Rollung und Raddrehung haben, indem wir mit Rollung eine Art der Be-

wegung des Auges, mit Raddrehungswinkel aber einen die jeweilige Stellung des Auges charakterisierenden Winkel bezeichnen. Wenn wir daher (wie später zuweilen geschehen) einem Winkel, dem diese letztere Bedeutung zukommt, den Namen „Rollungswinkel" geben, so führen wir damit eben dasselbe wieder ein, was an der Helmholtzschen Darstellung mit Recht als Übelstand empfunden und beanstandet worden ist. Dies ist z. B. von Zoth[1] geschehen, der den Namen Rollungswinkel einführen will für den Winkel, „um den sich der ursprünglich (in der Ausgangsstellung) vertikale Hornhautmeridian mit seinem oberen Ende temporal oder nasalwärts geneigt hat". Da das Auge von der Primärstellung aus in jede beliebige ihm überhaupt mögliche Stellung ohne Rollung gebracht werden kann, so versteht sich, daß auch der so definierte Rollungswinkel seine Werte ändern kann, ohne daß die Bewegung eine Rollungskompenente besitzt, eben dasjenige, was wir bei der Helmholtzschen Doppelbenutzung des Wortes Raddrehung als unzweckmäßig anerkennen mußten. Will man also die Augenstellungen noch durch andere Winkel als durch den Raddrehungswinkel charakterisieren (was natürlich in mancherlei Weise möglich ist), so wird es unbedingt geboten sein, noch andere Namen dafür heranzuziehen. Dieser Forderung entspricht der Vorschlag Meinongs[2], als Aberration die Abweichung des ursprünglich (d. h. in der Primärstellung) vertikalen Meridianes von der Vertikalebene zu bezeichnen.

4. Die Frage, ob bei seitlicher Neigung des Kopfes das Auge eine Rollung in entgegengesetztem Sinne (sogen. kompensatorische Rollung) erfährt, ist sehr viel umstritten worden. Helmholtz hat sie im Text auf Grund der Arbeiten von Ruete und Donders verneinend beantwortet. Später ist indessen nicht nur die Existenz solcher Rollungen durch zahlreiche einwandfreie Untersuchungen nachgewiesen, sondern es ist auch ihr Betrag durch messende Beobachtungen in zuverlässigen Untersuchungen und mit gut übereinstimmenden Ergebnissen ermittelt worden (Javal, A. Nagel, Mulder, Skrebitzky, Woinow, Donders, W. Nagel)[3].

Literatur und Methodik des Gegenstandes sind insbesondere in der erwähnten Arbeit von W. Nagel sehr vollständig und gründlich behandelt.

In methodischer Hinsicht ist vorzugsweise von Wichtigkeit, daß die andersartigen Augenbewegungen ganz ausgeschlossen werden, die Lage der Blicklinie zum Kopf also genau unverändert bleibt. Mehrere Methoden entsprechen dieser Forderung.

Man kann an den bekannten Beißbrettchen einen Träger anbringen, der

[1] Zoth, Augenbewegungen und Gesichtswahrnehmungen im Handbuch der Physiologie, herausgeg. von W. Nagel. Bd. III. S. 300.

[2] Meinong, Zeitschrift f. Psychologie usw. XVII. 1898. S. 182.

[3] Javal bei Wecker, *Traité théorique et pratique des maladies des yeux.* Paris 1866. — A. Nagel, Über das Vorkommen von wahren Rollungen des Auges um die Gesichtslinie. Archiv f. Ophth. XVII (1). 1871. S. 247. — E. Mulder, Over parallele Rollbewegingen der Oogen. Academ. Proefschrift. Onderzoekingen physiol. Laboratorium te Utrecht. III, 1. 1874. S. 168. — Derselbe, Über parallele Rollbewegungen der Augen. Archiv f. Ophth. XXI (1). 1875. S. 68. — Skrebitzky, Ein Beitrag zur Lehre von den Augenbewegungen. Archiv f. Ophth. XVII (1). 1871. S. 107. — Woinow, Beiträge zur Lehre von den Augenbewegungen. Archiv f. Ophth. XVII (2). 1871. S. 233. — Donders, Pflügers Archiv XIII. 1876. S. 419. — Derselbe, Arch. f. Ophth XVI (1870). — Derselbe, Über das Gesetz der Lage der Netzhaut in Beziehung zu der der Blickebene. Archiv f. Ophth. XXI (1). 1875. S. 125. — W. Nagel, Über kompensatorische Raddrehungen der Augen. Zeitschr. für Psychologie XII. S. 331. — Versuche mit negativem Ergebnis sind in neuerer Zeit allerdings auch noch einmal, nämlich von Contejean und Delmas, *Archives de physiologie normale et pathologique* 5. S. VI. 1894. S. 687 erhalten worden, ein Widerspruch, der vorderhand nicht aufgeklärt werden kann.

in passender Entfernung von den Augen einen auffälligen zur Erzeugung von Nachbildern geeigneten senkrechten Streifen auf indifferentem Grunde trägt. Fixiert man einen Punkt des Streifens für längere Zeit und neigt dann den Kopf gegen eine Schulter, so sieht man den Streifen mit seinem Nachbild in einem kleineren oder größeren Winkel gekreuzt (Donders).

Man kann auch an dem Beißbrettchen einen kleinen Spiegel befestigen, in dem das Auge sein eigenes Bild wahrnimmt und die Pupille fixiert. Die Rollungen bei seitlicher Kopfneigung sind dann ohne weiteres sichtbar (W. Nagel). Ferner kann man die durch den (regelmäßigen oder unregelmäßigen) Astigmatismus des Auges bedingten Zerstreuungsfiguren benutzen. Nagel brachte, wiederum am Beißbrettchen befestigt, vor dem Auge ein Glimmerblättchen mit eingeritztem Kreuz an und dieses mit der Zerstreuungsfigur eines entfernten hellen Punktes in bestimmter Weise zur Deckung. Bei Neigung des Kopfes beobachtet man dann Drehungen der Zerstreuungsfigur gegen das Kreuz: dieses macht die Bewegung des Kopfes in vollem Umfange mit, jene, d. h. also das Auge, bleibt um einen gewissen Betrag dahinter zurück, es macht eine kompensatorische Rollung.

Endlich kann man die Lage des blinden Flecks zur Beobachtung der Rollungen benutzen. Der Beobachter fixiert einen bestimmten Punkt einer ihm gegenüber stehenden Wand und hat die Aufgabe, eine dem blinden Fleck genau entsprechende Marke so einzustellen, daß sie vollständig verschwindet, also gerade auf diesem sich abbildet. Dabei wird die zum Kopf unveränderte Lage des Auges dadurch garantiert, daß mit jenem Fixationspunkt eine Marke zur Deckung gebracht wird, die an einem mit dem Kopf vollkommen fest verbundenen Brillengestell befestigt ist. Der Versuch wird bei verschiedenen Neigungen des Kopfes gegen die Schulter wiederholt, und die Winkelwerte, um die sich die Verbindungslinie des Fixationspunktes mit irgend einem Punkte des blinden Fleckes gegen ihre Ausgangsstellung neigt, können mit den gleichzeitig beobachteten Neigungen des Kopfes verglichen werden.

Die Methode der Nachbilder, die des blinden Flecks und unter Umständen auch die der Astigmatismusfiguren sind zu messenden Beobachtungen geeignet.

Was die Ergebnisse der Beobachtung anlangt, so zeigt sich, daß die Rollung immer nur einen kleinen Bruchteil der Kopfneigung ausmacht; und zwar beträgt derjenige Bruchteil, der durch die entgegengesetzte Rollung kompensiert wird, bei kleinen Drehungen etwa $^1/_5$, um bei großen bis auf $^1/_{10}$ zu sinken, wie dies die folgenden Zusammenstellungen zeigen.

Kopfneigung	15°	25°	35°	45°	55°	65°
Rollung (Mulder) . . .	3	4	5	5,5	5,5	6
„ (Küster) . . .	4	6	6,5	7	8	9
„ (Skrebitzky) . .	2	2,6	4,2	5,5	6,8	7,7

Beobachtungen von W. Nagel.

Kopfneigung .	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
Rollung . . .	1,3?	3,8	5,2	5,4,	6,3	6,7	6,8	8,0	8,1	8,6
Kompensierter Bruchteil der Kopfdrehung	1/7,7?	1/5,3	1/5,8	1/7,4	1/7,9	1/9	1/10,3	1/10,0	1/11,1	1/11,8.

Ungleichheit der kompensatorischen Rollbewegung für rechtes und linkes Auge sind von DELAGE[1] angegeben worden, doch dürfte es sich dabei nach Beobachtungen von ANGIER[2] wohl um Täuschungen handeln.

Das Interesse der ganzen Erscheinung liegt vornehmlich in ihrer Abhängigkeit von den statischen Organen und im Zusammenhang damit ihrer Beeinflussung durch experimentelle Eingriffe, ihrer Ungleichheit bei verschiedenen Tieren usw., Verhältnisse, auf die hier nicht einzugehen ist.

5. Hierher gehörige Abweichungen vom LISTINGschen Gesetz sind von HERING beschrieben worden, und zwar von der Art, daß Hebungen und Senkungen des Blickes mit einem gewissen Betrage von Rollung begleitet sind. HERING fand (a. a. O. S. 480), „daß die mittleren Längsschnitte, wenn sie in der Primärstellung nach oben divergieren, ihre Divergenz bei Hebung der Blickebene verstärken, während sie bei Senkung derselben allmählich parallel und sogar konvergent nach oben werden können".

Überdies zeigte sich auch, daß die Divergenz der mittleren Längsschnitte wuchs, wenn bei beliebiger Neigung der Blickebene die Gesichtslinien nach rechts oder links gewandt wurden und daß der Zuwachs um so stärker war, je stärker die Blickebene gehoben war.

6. Die Kombination der Konvergenzbewegungen mit Rollungen sind später noch vielfach untersucht worden (HERING[3], LANDOLT[4] und DONDERS[5]. Auch diese Autoren fanden, wie VOLKMANN den Zusammenhang in dem Sinne, daß bei Konvergenz der Blicklinien die scheinbar vertikalen Meridiane eine zunehmende Divergenz nach oben erhalten. Die Abweichungen wachsen nach HERING mit der Zunahme des Konvergenzwinkels und mit der Senkung der Blickebene und können Beträge von 5° erreichen (a. a. O. S. 96). Die stärksten Abweichungen dieser Art sind von LANDOLT beobachtet worden, dessen Ergebnisse die nachstehende Tabelle zusammenfaßt.

Konvergenz	Erhebung				Senkung			
	25°	20°	10°	0°	10°	20°	30°	40°
0°	1° 30′	50′	40′	[30′]	10′	5′	– 10′	– 10 5′
6°	2° 30′	2°	1° 5′	1° 45′	1° 20′	1°	1° 10′	1° 30′
8°	3°	2° 20′	2° 20′	2° 5′	1° 30′	1° 30′	1° 30′	1° 35′
10°	4° 20′	3° 30′	3°	2° 30′	2°	1° 40′	1° 50′	1° 40′
12°	5°	3° 40′	3° 10′	2° 55′	2° 10′	2°	2°	1° 30′
14°	7° 30′	4°	3° 40′	3° 30′	2° 40′	2° 5′	2° 20′	1° 30′
16°	8°	5° 30′	4° 5′	3° 55′	3°	2° 10′	2° 30′	2°
18°	9°	5° 30′	5°	4° 50′	4°	3°	2° 50′	2° 30′
20°	11°	7° 30′	6°	5° 40′	4° 30′	3° 30′	3° 10′	2° 45′
25°	15°	8°	7°	5° 52′	4° 50′	4°	3° 30′	2°
30°	16° 30′	10°	8°	6° 50′	5° 50′	4°	4°	1°

Bei unsymmetrischen Konvergenzen fand HERING die relative Lage der Netzhäute gegeneinander etwa ebenso, wie bei gleich starker symmetrischer Konvergenz.

---

[1] YVES DELAGE, *Le mouvement de torsion de l'oeil. Arch. de zoologie experimentale et générale.* 1903.

[2] ANGIER, Vergleichende Messung der kompensat. Rollung der Augen. Ztschr. für Psychologie u. Physiol. d. Sinnesorg. XXXVII. S. 235.

[3] HERING, Die Lehre vom binokularen Sehen. 1868.

[4] LANDOLT, Handbuch der ges. Augenheilkunde II 1776. S. 660.

[5] DONDERS, PFLÜGERS Archiv XIII. S. 419. 1876.

7. Die gesamten hier beschriebenen Bewegungen, deren Erfolg darin besteht, binokulare Diplopie zu beseitigen, die also „im Interesse des Einfachsehens" stattfinden, werden neuerdings mit dem Namen der Fusionsbewegungen bezeichnet. Als neuere diesen Gegenstand betreffende Untersuchungen seien hier die von NAGEL, SCHMIDT-RIMPLER, SCHMIEDT, GUILLERY, HOFMANN und BIELSCHOWSKY erwähnt[1].

In bezug auf den Betrag der solcher Art zu erreichenden Modifikationen der Augenstellung schließen sie sich den bereits im Text erwähnten nahezu an. So konnte A. NAGEL durch Rollung Drehungen der Sehobjekte bis 10° überwinden. HOFMANN und BIELSCHOWSKY fanden, daß die höchsten Werte in der Änderung der Augenstellung gewonnen würden, wenn die Verschiebungen der Sehobjekte über den noch ausgleichbaren Betrag hinausgingen und unterschieden demgemäß ein „Ausgleichsmaximum" von dem Maximum der Ablenkung. Sie konnten die letztere für Höhenabweichungen bis auf 5—6°, für Rollungen im äußersten Fall bis 16°, für Divergenzen bis etwa 8° treiben, wenn die Versuche in systematischer Weise vielfach wiederholt wurden. Bemerkenswert ist, daß die Rollung sich annähernd gleichmäßig auf beide Augen verteilt, auch wenn nur das von dem einen betrachtete Objekt eine reale Drehung erfährt, daß also in diesem Falle eine symmetrische Rollung der beiden Augen stattfindet, was in Übereinstimmung mit der von HELMHOLTZ gemachten Angabe sowohl A. NAGEL, wie auch HOFMANN und BIELSCHOWSKY bestätigen.

Die Beobachtungen von GUILLERY und SCHMIDT-RIMPLER betreffen insbesondere die Geschwindigkeit, mit der die Fusionsbewegungen eintreten, ihre Beeinflussung durch Übung, psychische Zustände, Narcotica u. dgl.

Übrigens handelt es sich bei den Fusionen nicht eigentlich um bestimmte Bewegungen, sondern vielmehr um gewisse, sich allmählich entwickelnde Modifikationen in der Stellung der beiden Augen gegeneinander, die dann bei beliebigen Bewegungen sich in übereinstimmender Weise erhalten, also wohl um konstante Innervationen, die sich den wechselnden der gewöhnlichen willkürlichen Innervation dauernd hinzufügen.

Ein für die Augenheilkunde wichtiger Punkt, der, da er gleichfalls die Bedeutung des Fusionszwanges betrifft, an dieser Stelle erwähnt werden mag, ist die Frage nach der Stellung der Augen, wenn der normalerweise durch die Sehobjekte gegebene Fusionszwang aufgehoben, z. B. das Gesichtsfeld ganz verdunkelt ist. Normalerweise soll in diesem Falle eine Stellung eintreten, die annähernd der Primärstellung entspricht. Erheblichere Abweichungen davon werden als Heterophorie bezeichnet (spezieller in leicht verständlichem Sinne als Endo-Exophorie, Hyper- und Hypophorie). Sie stellen Anomalien des Muskelapparates dar, die sich bei gewöhnlichem Sehen nicht direkt verraten, eben weil hier der Fusionszwang genügt, um normale Augenstellungen herbeizuführen. Es ist aber hierzu eine nicht normale Muskelanstrengung erforderlich, womit denn eine Reihe von Störungen verknüpft zu sein pflegt, auf denen das praktische Interesse der Verhältnisse beruht. Da bei völliger Verdunklung die Stellungen der Augen nicht beobachtet werden können, so muß man sich zur Prüfung auf Heterophorie anderer Methoden bedienen. Man kann z. B. den

[1] NAGEL, Das Sehen mit zwei Augen. 1862. S. 51. — Derselbe, Archiv f. Ophthalm. XIV (2). 1868. S. 235. — SCHMIDT-RIMPLER, Archiv f. Ophth. XXVI (1). S. 115. 1880. — SCHMIEDT, Archiv f. Ophth. XXXIX (4). 1893. S. 233. — GUILLERY, PFLÜGERS Archiv LXXIX. 1900. S. 597. — HOFMANN und BIELSCHOWSKY, PFLÜGERS Archiv LXXX. 1900. S. 1.

Fusionszwang dadurch beseitigen, daß man dem einen Auge eine sehr starke Zylinderlinse vorsetzt (sogen. MADDOXsche Stäbchen). Bei senkrechter Stellung des Stäbchens erscheint eine senkrechte helle Linie als breites Band und es kann nun ermittelt werden, an welcher Stelle dieses Streifens die scharfe Linie, die das andere Auge wahrnimmt, zu liegen scheint. Hiernach läßt sich dann beurteilen, ob die Blicklinien des mit dem Stäbchen bewaffneten Auges gleichfalls gegen die helle Linie gerichtet ist, oder in welchem Sinne und welchem Betrage sie davon abweicht.

Abnorme Augenbewegungen, die nicht vom Fusionszwange abhingen, sondern in gewisser Weise der Willkür unterstanden, sind in einigen Fällen beobachtet worden. Da das Interesse dieser Erscheinungen wesentlich in ihrer Bedeutung für die Vorstellungen liegt, die wir uns von der Entstehung der Bewegungsgesetze machen können, so bleibt eine Berücksichtigung derselben dem Schlußkapitel vorbehalten.

8. Die HELMHOLTZsche Darstellung ist an dieser Stelle mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet und gerät hierdurch in einen allerdings nur scheinbaren Widerspruch mit später behandelten Tatsachen. Es wird nämlich hier angegeben, daß Linien, je nach der Blickrichtung mit der sie betrachtet werden, in verschiedener Lage erscheinen. Dagegen wird an späterer Stelle gezeigt (und sogar im dortigen Zusammenhange mit besonderem Nachdrucke betont), daß keineswegs immer die auf dem Netzhauthorizont abgebildeten Gegenstände für horizontal gehalten, daß, wie man dies auch ausdrücken kann, bei der Beurteilung der objektiven Lage der gesehenen Gegenstände die Raddrehungswinkel, die Abweichungen des Netzhauthorizontes von der Blickebene, keineswegs außer acht gelassen, sondern annähernd mit ihrem richtigen Werte in Betracht gezogen, und demgemäß mit großer Annäherung die in Wirklichkeit horizontal liegenden Erstreckungen bei jeder Blickrichtung für horizontal gehalten werden.

Die Lösung dieses Widerspruches ergibt sich, wenn man schärfer als es HELMHOLTZ hier getan hat, die bei verschiedenen Stellungen des Auges stattfindenden Wahrnehmungen von den bei der Bewegung selbst erzeugten und die Bewegung als solche begleitenden scheidet und dabei beachtet, was auf den ersten Blick überraschend erscheinen kann und erst später in voller Schärfe und mit Sicherheit festgestellt worden ist, daß zwischen diesen Dingen keineswegs ein ganz einfacher Zusammenhang stattzufinden braucht. In der Tat wird man ja auf den ersten Blick immer geneigt sein zu meinen, daß bei der Bewegung des Auges der Eindruck einer Verschiebung der Gegenstände nur dann entstehen wird, wenn sie bei der einen und anderen Stellung in verschiedener Lage wahrgenommen werden, und daß die gesehene Bewegung eben dem Unterschiede, der bei der einen und der anderen Augenstellung wahrgenommenen Lage entsprechen werde. Tatsächlich aber ist dies keineswegs der Fall; die Bedingungen der Bewegungseindrücke sind vielmehr besondere und aus den Lageeindrücken keineswegs ohne weiteres abzuleiten*. Und so kann es z. B. auch sehr wohl kommen, daß bei einer Bewegung des Auges unmittelbar und zwingend der Eindruck einer Bewegung der Gegenstände entsteht, gleichwohl aber dieselben in der Anfangs- und Endstellung der Augen, vor und nach jener

---

* Wir kommen auf die hier berührten Verhältnisse, die direkte Wahrnehmung von Bewegungen, später noch etwas ausführlicher zurück (s. Anm. 1 zu § 29). K.

Scheinbewegung, in der nämlichen Lage gesehen werden. Eben dies ist der hier verwirklichte Fall. Läßt man bei gehobener Blickebene den Blick an einer hochgelegenen Horizontallinie entlang laufen, so hat man sehr deutlich den Eindruck an einer nicht geraden sondern nach unten konkaven Linie entlang zu gleiten. Sobald man dagegen den Blick anhält und einen beliebigen Punkt der Linie fixiert, wird der dem Fixationspunkt benachbarte Teil der Linie seiner wahren Lage entsprechend für horizontal gehalten. Die Wahrnehmung ruhender Objekte verhält sich also so wie es HELMHOLTZ an der eben erwähnten späteren Stelle angegeben hat; und insofern bedarf allerdings die Fassung hier einer Berichtigung. Es schließt dies aber keineswegs aus, daß bei der Bewegung der Augen die Eindrücke von Verschiebungen entstehen.

Die Beachtung dieser Verhältnisse ist um so wichtiger, als auch die ganze Betrachtung, auf die HELMHOLTZ sein Prinzip der leichtesten Orientierung aufbaut, in der entsprechenden Weise einer gewissen Präzisierung des Ausdrucks bedarf. Die Überlegung, von der HELMHOLTZ ausgeht, ist ja die, daß wenn wir den Blick einem Punkt zuwenden, der gegenwärtig auf dem exzentrischen Punkte *e* abgebildet ist, somit das jetzt in *e* befindliche Netzhautbild nach der Mitte der Fovea gleitet, wir die damit verknüpfte Verschiebung aller übrigen Netzhautbilder am leichtesten als den Ausdruck einer Bewegung des Auges erkennen werden, wenn die Wendung des Blickes nach dem auf *e* abgebildeten Objekt stets mit derselben Verschiebung aller übrigen Netzhautbilder begleitet ist, d. h. also durch Drehung um dieselbe Achse bewirkt wird. Die Richtigkeit dieses Prinzips wird außer Zweifel stehen, wenn es sich zeigt, daß tatsächlich ein bestimmter Fixationswechsel nur dann ohne Scheinbewegung vor sich geht, wenn er durch Drehung um eine bestimmte Achse bewirkt wird, während Scheinbewegungen jedesmal eintreten, wenn er durch Drehung um eine andere Achse herbeigeführt wird. Dies ist nun tatsächlich der Fall. Wenden wir den Blick auf den jetzt exzentrisch in *e* abgebildeten Punkt (führen wir die Fovea an den zuvor von *e* eingenommenen Ort), so treten Scheinbewegungen nur dann nicht ein, wenn diese Bewegung auf dem kürzesten Wege (ohne Rollung) erfolgt, während sie in jedem andern Falle von Scheindrehungen der Gegenstände begleitet ist. Diejenigen Täuschungen, deren Reduktion auf einen Minimalbetrag das Prinzip der leichtesten Orientierung fordert, sind also tatsächlich vorhanden.

Der hier vertretenen Auffassung entspricht es, wenn HELMHOLTZ das Prinzip dahin formuliert, daß die Summe der Fehlerquadrate für alle vorkommenden Bewegungen des Auges ein Minimum werden, welche Formulierung auch der rechnerischen Durchführung zugrunde liegt. Wenn dagegen an mehreren Stellen statt dessen die Unterschiede der Wahrnehmung bei verschiedenen Stellungen des (ruhenden) Auges in Betracht gezogen werden, so ist dies eine Modifikation, die, wie wir gegenwärtig sagen müssen, der anderen auf der Bewegung als solche bezüglichen nicht substituiert werden darf.

9. Im Anschlusse an die hier von HELMHOLTZ gemachte Angabe haben später HERING[1] und RITZMANN[2] des genaueren die zwischen Kopf- und Augenbewegungen stattfindenden Beziehungen geprüft. Wir müssen, wie hier vorausgeschickt sei, bei der Erwägung dieser Verhältnisse zwei Dinge auseinander halten. Es kann nämlich erstens gefragt werden, ob der Kopf auf dem Rumpfe

[1] HERING, Die Lehre vom binokularen Sehen 1868. S. 106.
[2] RITZMANN, Archiv f. Ophthalmologie XXI. 1. 1875. S. 311.

nach den gleichen Gesetzen bewegt wird, wie das Auge im Kopf, ob also auch für ihn die ganze Stellung sich als eindeutige Funktion derjenigen Lage darstellen läßt, die der ursprünglich sagittalen Linie jeweils zukommt, und ob auch für ihn gilt, daß die Bewegungen aus der Primärstellung heraus um frontale Achsen stattfinden. Von dieser Frage müssen wir die andere scheiden, ob zwischen den jeweiligen Bewegungen (oder Stellungen) einerseits des Kopfes auf dem Rumpfe, andererseits der Augen im Kopf ein fester Zusammenhang besteht. In dieser Hinsicht würde namentlich von Interesse sein, ob die Achsen, um die wir uns einerseits den Kopf, andererseits das Auge aus ihren Primärstellungen gedreht denken müssen, um sie in ihre jeweilige Stellung zu bringen, stets untereinander parallel sein müssen. Wäre dies der Fall, so würde sich daraus (wie leicht ersichtlich) eine besonders einfache Konsequenz ergeben; es würde nämlich, wenn der Blick auf einen beliebigen Punkt gewendet wird, die Lage des Netzhauthorizontes und die Projektion von Nachbildern die nämliche sein müssen, gleichviel ob der Blick die betreffende Richtung durch Bewegung des Auges allein oder durch Kopf- und Augenbewegung erreicht hätte. Dagegen würde, wie man sich an geeigneten Beispielen leicht klar machen kann, eine solche Übereinstimmung nicht bestehen, wenn zwar Kopf- sowohl wie Augenbewegungen für sich dem Listingschen Gesetze folgten, ihre Kombination aber nicht fixiert wäre. So würde, wenn wir uns den Kopf gehoben und das Auge dann (für sich dem Listingschen Gesetze gemäß) nach der Seite gewendet denken, der Netzhauthorizont dauernd mit der Blickebene zusammenfallen, während die von Null verschiedenen Raddrehungswinkel erhalten werden, wenn die Blicklinie allein durch Augenbewegung in die gleiche Richtung gebracht wird.

Die vorliegenden Untersuchungen unterrichten uns in der Hauptsache nur über die zweite Frage, den Zusammenhang von Kopf- und Augenbewegungen. Ritzmann verfuhr so, daß er (mittels des Beißbrettchens) mit dem Kopf ein Röhrchen fest verband, dessen Achse genau mit der Blicklinie in ihrer Primärstellung zusammenfiel. Wurde nun der Blick durch kombinierte Kopf- und Augenbewegung auf einen beliebigen Punkt einer dem Beobachter gegenüberstehenden frontalen Wand gerichtet, so konnte man durch jenes Röhrchen visierend denjenigen Punkt angeben, gegen den die Bewegung des Kopfes allein die Blicklinie gerichtet haben würde. Ferner war mit demselben Gestell ein um diese Achse drehbares Bogenstück mit Gradteilung verbunden, auf dem eine Marke verschoben werden konnte. Dreht man diesen Gradbogen so, daß er durch den fixierten Punkt geht, und bringt man die auf ihm verschiebliche Marke mit jenem zur Deckung, so erfährt man, um welche Achse und um welche Beträge das Auge aus seiner Primärstellung gedreht ist. Die Beobachtungen Ritzmanns ergaben eine einfache Gesetzmäßigkeit zunächst insofern, als wenn von der Primärstellung ausgehend gerade über oder unter, rechts oder links vom primären Fixationspunkt gelegene Punkte fixiert werden, die Bewegungen des Kopfes und des Auges um die gleichen Achsen (senkrechte bzw. horizontale und frontale) stattfinden. Schon hier jedoch ist die quantitative Beziehung zwischen Kopf- und Augenbewegungen für verschiedene Personen eine sehr verschiedene. Bei der Hebung des Blicks machten von den untersuchten Personen einige nur $^1/_3$, andere bis $^4/_5$ der Bewegungen mit den Augen. Durchgängig sind aber bei der Senkung des Blickes die Augenbewegungen relativ am stärksten, die des Kopfes am wenigsten beteiligt. Bei Wendung des

Blickes auf Punkte, die zugleich Höhen- und Seitenabweichung besitzen, ist die Übereinstimmung der Achsen häufig keine genaue, ohne daß sich für die Abweichungen bestimmte Regeln aufstellen ließen. Endlich aber zeigte sich, daß schon bei längerem Verweilen des Blickes auf einem Punkte die Verhältnisse sich meist allmählich ändern, so zwar, daß der Anteil der Kopfbewegung an der Gesamtablenkung größer, der der Augenbewegung kleiner wird (diese sich also ihrer Primärstellung annähern). Und in noch höherem Maße kann die Kopfstellung bei bestimmter Blickrichtung differieren, je nach den vorausgehenden Blickrichtungen und den Wegen, auf denen der betreffende Fixationspunkt erreicht wird.

Die Versuche lehren, daß in bezug auf die Kombination von Kopf- und Augenbewegungen jedenfalls kein fester Zusammenhang, sondern ein erhebliches Maß von Freiheit besteht. Ob die Bewegungen des Kopfes für sich betrachtet dem Listingschen Gesetze folgen, gestatten sie nicht zu beurteilen, schon weil nur die Lage einer zum Kopfe festen Linie (der Primärlage der Blicklinie) ermittelt wurde.

In den Versuchen Herings wurde die Stellung des Kopfes für sich überhaupt nicht kontrolliert, vielmehr wurde die Lage der Nachbilder bei kombinierten Kopf- und Augenbewegungen geprüft und mit der bei alleinigen Augenbewegungen zu beobachtenden verglichen. Und zwar fand Hering „bei Wiederholung der Nachbildversuche mit frei beweglichem Kopf, daß wenn man den Blick längs einer seitlich gelegenen Vertikalen auf- und abwandern läßt, das Nachbild eines in die Primärstellung fixierten vertikalen Streifens sich mit jener Vertikalen immer annähernd deckt". „Hierbei wendet man den Kopf seitwärts, jedoch nicht so weit, daß die eben betrachtete Vertikalschnur in die Meridianebene zu liegen kommt." Die Lage der Nachbilder ist somit in der Tat verschieden, je nachdem die Fixation gewisser Punkte durch kombinierte Kopf- und Augenbewegungen oder durch Augenbewegungen allein ausgeführt werden. Gemäß dem oben Gesagten folgt hieraus, daß zwischen Kopf- und Augenbewegungen ein fester Zusammenhang der dort erwähnten Art (parallele Lage derjenigen Achsen, um die Kopf bzw. Augen gedreht werden müssen, um aus der Primärstellung in die jeweilige übergeführt zu werden) nicht verwirklicht ist. Die Versuche lehren aber auch zugleich, daß die Bewegungen des Kopfes nicht genau dem Listingschen Gesetze gemäß stattgefunden haben können. Hätten Kopf- wie Augenbewegungen dieser streng entsprochen, so hätten allerdings die vertikalen Nachbilder dauernd mit der vertikalen Linie zusammenfallen können, jedoch nur dann, wenn die Seitenwendung allein durch Kopfbewegung, Hebung und Senkung allein durch Augenbewegung ausgeführt worden wäre, was ja nicht der Fall war.

Hiernach erscheint der Schluß berechtigt, daß auch die für sich betrachteten Kopfbewegungen dem Listingschen Gesetze wenigstens nicht streng und allgemein folgen, daß sie insbesondere bei den hier geprüften Bewegungsweisen in bestimmter Weise davon abweichen.

Übrigens darf wohl auch die Frage aufgeworfen werden, ob nicht die Art der Bewegungen auch durch die besondere Natur der gesehenen Gegenstände beeinflußt werden kann. So scheint es z. B. gerade bei den hier erwähnten Beobachtungen Herings recht wohl denkbar, daß eine unbewußte Tendenz, das annähernd senkrechte Nachbild mit den senkrechten Schnüren zur Deckung zu bringen, für die Bewegung des Kopfes von Bedeutung gewesen sei.

Im ganzen ergibt sich hiernach, daß von den eingangs gestellten Fragen jedenfalls die zweite verneint werden muß; es besteht zwischen Kopf- und Augenstellungen kein ganz regelmäßiger Zusammenhang, beide sind vielmehr mit einem beträchtlichen Grade von Freiheit untereinander kombinierbar; aber auch die erste ist nicht unbedingt zu bejahen; es ist mindestens wahrscheinlich, daß auch die Modalitäten der Kopfbewegungen an sich unter Umständen vom LISTINGschen Gesetze abweichende sind.

Es darf nicht unterlassen werden, hier hinzuzufügen, daß es ein gröbliches Mißverständnis des von HELMHOLTZ im Texte Gesagten wäre, wenn man meinen wollte, daß die soeben besprochenen Tatsachen dazu im Widerspruch stünden. HELMHOLTZ sagt nur und hat sicherlich auch nur gemeint, daß zwischen den Bewegungen des Kopfes und denjenigen der Augen eine gewisse Analogie stattfindet, vorzugsweise insofern, als auch die Bewegungen des Kopfes aus der Primärstellung heraus etwa um frontale Achsen ausgeführt werden. Eine annähernde Gültigkeit dieser Regel kann durch die dort angeführten Beobachtungen als erwiesen gelten, eine ganz strenge hat HELMHOLTZ wohl nicht behaupten wollen; wieweit und in welchem Betrage etwa Abweichungen von ihr zu bemerken sind, ist bis jetzt nicht speziell zum Gegenstande der Untersuchung gemacht worden und läßt sich aus den vorliegenden Ergebnissen nicht entnehmen.

Noch ferner hat es wohl HELMHOLTZ gelegen, eine ganz allgemeine Gültigkeit des LISTINGschen Gesetzes für die Kopfbewegungen (insbesondere auch für Bewegungen zwischen Sekundär- und Tertiärstellungen) anzunehmen. Und ebensowenig dürfte er eine feste funktionelle Verknüpfung zwischen Augen- und Kopfbewegungen für wahrscheinlich gehalten haben; wenigstens findet sich keine Äußerung oder Angabe, die uns berechtigte, dies zu vermuten.

10. Die berichtigte Fassung, in der wie oben erwähnt die Gleichungen 4 f in der zweiten Auflage der Physiologischen Optik abgeleitet werden ist die folgende:

Daraus folgt, daß der Winkel, den die Visierebene der Gleichung 4) mit dem Netzhauthorizont macht, dessen Gleichung ist

$$0 = \zeta \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4\text{a}).$$

gegeben wird durch die Gleichung

$$\cos k = -\frac{\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cdot \cos^2\vartheta}{\sqrt{\sin^2\vartheta + \cos^2\alpha\cos^2\vartheta}}$$

oder

$$\operatorname{tang} k = \frac{\cos\vartheta\sin\vartheta(1-\cos\alpha)}{\sin^2\vartheta + \cos\alpha\cos^2\vartheta} \quad \ldots \ldots \quad 4\text{b}).$$

Der Winkel k, welcher zwischen der zeitigen Lage des Netzhauthorizonts und der Visierebene liegt, ist hierdurch gegeben.

Der Winkel k' zwischen der Ebene des ursprünglich senkrechten Meridians $v = 0$ und einer durch die senkrechte z-Achse und die Blicklinie gelegten Ebene

$$x\sin\alpha\cos\vartheta - y\cos\alpha = 0$$

wird in ähnlicher Weise gefunden

$$\operatorname{cotg} k' = \frac{\cos\vartheta\sin\vartheta(1-\cos\alpha)}{\cos^2\vartheta + \sin^2\vartheta\cos\alpha} \quad \ldots \ldots \quad 4\text{c}).$$

Nun sind häufig nicht die Winkel α und ϑ zur Abmessung der Stellung der Blicklinie gebraucht worden, sondern entweder der Erhebungswinkel λ und Seitenwendungswinkel μ, wie sie oben definiert wurden, oder die

Winkel, welche FICK die *Longitudo* und *Latitudo* genannt hat, die mit l und m bezeichnet werden mögen. Diese sind noch in die Formeln 4b) und 4c) einzuführen, um sie zur Berechnung so ausgeführter Versuche geschickt zu machen.

Der Erhebungswinkel λ ist der Winkel zwischen der Visierebene

$$x \sin\alpha \sin\vartheta + z \cos\alpha = 0$$

und der Ebene $z = 0$, seine Tangente ist hiernach

$$\operatorname{tang}\lambda = \frac{z}{x} = -\operatorname{tang}\alpha \sin\vartheta .$$

Der Seitenwendungswinkel ist gleich dem Winkel zwischen der Äquatorialebene des Auges $\xi = 0$ und der Ebene, welche durch die y-Achse senkrecht zur Visierebene geht

$$x \cos\alpha - z \sin\alpha \sin\vartheta = 0$$

oder nach Substitution der Werte aus 2b)

$$0 = \xi[\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta] - v \sin\alpha \cos\vartheta [\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta]$$
$$+ \zeta \sin\alpha \sin\vartheta \cos^2\vartheta [\cos\alpha - 1],$$

woraus nach denselben Regeln wie oben folgt, daß der Winkel μ zwischen dieser Ebene und der Ebene $\xi = 0$, sei

$$\cos\mu = \sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta}.$$

Zur Bestimmung von α und ϑ hat man also die beiden Gleichungen

$$\operatorname{tang}\lambda = -\operatorname{tang}\alpha \sin\vartheta ,$$
$$\cos^2\mu = \cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta ,$$

woraus folgt

$$\cos\alpha = \cos\mu \cos\lambda ,$$
$$\sin\vartheta = \mp \frac{\cos\mu \sin\lambda}{\sqrt{1 - \cos^2\mu \cos^2\lambda}}$$

oder

$$\operatorname{tang}\vartheta = \sin\lambda \operatorname{cotang}\mu .$$

Wenn wir diese Werte in 4b) und 4c) setzen, erhalten wir

$$\operatorname{tang} k = -\frac{\sin\mu \sin\lambda}{\cos\mu + \cos\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{d})$$

und

$$\operatorname{tang} k' = -\frac{\sin\mu \cos\mu \sin\lambda (1 - \cos\mu \cos\lambda)}{\sin^2\mu + \cos^3\mu \sin^2\lambda \cos\lambda} .$$

Nach einer ähnlichen Methode findet man

$$\operatorname{tang} k = -\frac{\sin m \cos m \sin l (1 - \cos m \cos l)}{\sin^2 m + \cos^3 m \sin^2 l \cos l} ,$$

$$\operatorname{tang} k' = \frac{\sin m \sin l}{\cos m + \cos l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{e}).$$

Wann die hier gebrauchten Winkel positiv, wann negativ zu nehmen sind, ist oben festgesetzt worden.

Wenn man statt der Winkel k, μ, λ und k', m, l ihre Hälften in die Gleichungen 4d) und 4e) einführt, bekommen diese die zur logarithmischen Rechnung bequemere Gestalt

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tang}\left(\frac{k}{2}\right) &= -\operatorname{tang}\left(\frac{\mu}{2}\right)\cdot\operatorname{tang}\left(\frac{\lambda}{2}\right) \\ \operatorname{tang}\left(\frac{k'}{2}\right) &= \operatorname{tang}\left(\frac{m}{2}\right)\cdot\operatorname{tang}\left(\frac{l}{2}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4f).$$

11. Das binokulare Verfahren zur Prüfung der Drehungsgesetze ist nach den im Text erwähnten Versuchen namentlich von Hering[1] und Donders[2] benutzt und in methodischer Hinsicht modifiziert worden.

Beide gingen so zu Werke, daß ein von dem einen Auge gesehener Faden (Draht oder Haar) binokular zur Deckung mit der Mitte zweier anderer untereinander paralleler vom anderen Auge wahrgenommener Fäden gebracht wurde. Es kann dann mit außerordentlich großer Genauigkeit der eine Faden so eingestellt werden, daß er den beiden anderen, zwischen denen er gesehen wird, parallel erscheint.

Der von Donders konstruierte Apparat hat den Namen des Isoskops erhalten.

12. Weitere Bestimmungen der gleichen Art sind später noch von Volkmann[3] gemacht worden. Die Durchschnittswerte seiner an 30 Schädeln vorgenommenen Messungen enthält zusammen mit den schon im Text angeführten Zahlen (Ruete und Fick) in einheitlicher Bezeichnung die folgende von Zoth[4] gegebene tabellarische Zusammenstellung. Die Richtung der X-Achse ist frontal (nach außen positiv gerechnet), die der Y-Achse sagittal (nach vorn positiv gerechnet), die der Z-Achse vertikal (nach oben positiv gerechnet).

Koordinaten der Ursprungs- und Ansatzpunkte der Augenmuskeln für die Ausgangsstellung.

Muskeln	Koordination	Ursprünge			Ansätze		
		Fick	Ruete	Volkmann	Fick	Ruete	Volkmann
Rect. sup.	x	− 16	− 10,67	− 16	0	+ 2	0
	y	− 31	− 32	− 33,05	+ 7,9	+ 5,67	+ 6,34
	z	+ 6,5	+ 4	+ 3,6	+ 9,1	+ 10	+ 10,48
Rect. inf.	x	− 17	− 10,8	− 16	0	+ 2,2	0
	y	− 30	− 32	− 33,05	+ 7,9	+ 5,77	+ 6,73
	z	+ 2	− 4	− 2,4	− 9,1	− 10	− 10,24
Rect. ext.	x	− 15	− 5,4	− 13	+ 9,1	+ 10,8	+ 10,08
	y	− 31	− 32	− 35,29	+ 7,9	+ 5	+ 5,21
	z	+ 2	0	+ 0,6	0	0	0
Rect. int.	x	− 18	− 14,67	− 17	− 9,1	− 9,9	− 9,65
	y	− 30	− 32	− 31,29	+ 7,9	+ 6	+ 7,55
	z	+ 4	0	+ 0,6	0	0	0
Obl. sup.	x	− 19,6	− 14,1	− 15,27	+ 4,6	+ 2	+ 2,9
	y	+ 10,9	+ 10	+ 6,95	− 2,7	− 3	− 5,70
	z	+ 12,8	+ 12	+ 12,25	+ 9,9	+ 11	+ 11,05
Obl. inf.	x	− 18	− 8,1	− 11,1	+ 10,4	+ 8	+ 8,71
	y	[−30?]	+ 6	+ 10,05	− 6	− 9	− 8,47
	z	[+ 6?]	− 15	− 15,46	0	0	0

[1] Hering, Die Lehre vom binokularen Sehen. Leipzig 1868.
[2] Donders, Archiv f. Ophthalm. XXI. 3. 1875. S. 100.
[3] Volkmann, Berichte der königl. sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, Math.-phys. Klasse 1869.
[4] Zoth, Sitzungsber. der Wiener Akademie, Math.-naturw. Klasse 109 (3). 1900 und Nagels Handbuch der Physiologie. III. S. 289.

Es ist zu beachten, daß RUETE und FICK als Anfangspunkt des Koordinatensystems den Mittelpunkt, VOLKMANN dagegen den Drehpunkt des Auges benutzte, den er 1,29 mm hinter dem Mittelpunkt annahm. In den Originalangaben, ebenso auch in der ZOTHschen Zusammenstellung, müssen daher die VOLKMANNschen Y-werte um 1,29 vermindert werden, um mit den anderen vergleichbar zu sein. Ich habe diese Korrektion an den ZOTHschen Zahlen angebracht, so daß sich in der obigen Tabelle alles auf den Mittelpunkt des Auges bezieht.

Auch die hiernach berechneten Lagen der Drehungen gebe ich nachstehend gemäß einer Zusammenstellung ZOTHS mit den entsprechenden älteren Bestimmungen von FICK und RUETE.

Winkel der Halbachsen der Drehung.

Mit der positiven	x-Achse (temporal)		y-Achse (vorn)		z-Achse (oben)	
für den	RUETE	VOLKMANN	RUETE	VOLKMANN	RUETE	VOLKMANN
R. externus . .	90°	90° 52′	90°	88° 40′	180°	178° 35′
R. internus . .	90°	89° 19′	90°	90° 45′	0°	1° 01′
R. superior . .	161° 30′	150° 05′	109° 30′	113° 47′	90°	72° 55′
R. inferior . . .	19°	31° 53′	71°	66°	90°	108° 34′
O. superior . . .	51°	53° 46′	141°	146° 42′	84° 30°	100° 45′
O. inferior . . .	127°	129° 19′	37°	39° 54′	90°	83° 46′

Eine Reihe von interessanten Angaben über die den Bulbus umgebenden Teile und ihre mechanische Bedeutung, insbesondere als Hemmungseinrichtungen für die Augenbewegungen sind von MOTAIS[1] gemacht worden. Doch darf auf die Wiedergabe derselben wegen ihrer vorzugsweise anatomischen Bedeutung hier verzichtet werden.

13. Weitere Formen von Ophthalmotropen sind u. a. von LANDOLT, AUBERT, DONDERS, BROWNING, BOWDITCH[2] angegeben worden. In wesentlich einfacherer aber für viele Zwecke vielleicht noch nützlicherer Weise als die Ophthalmotrope dienen die von verschiedenen Autoren ausgeführten schematischen Zeichnungen zu einer Veranschaulichung der den einzelnen Augenmuskeln zukommenden Wirkungen. Als sehr verbreitet und besonders anschaulich sei hier das von HERING angegebene (Fig. 20) angeführt. Es stellt die Bahnen dar, die der Durchschnitt der Blicklinie mit einer frontalen Ebene auf dieser durchlaufen würde bei isolierter Tätigkeit der einzelnen Muskeln. Die stärkeren Striche geben zugleich die Lage an, in der sich das Nachbild eines in der Primärstellung fixierten horizontalen Streifens projiziert, lassen also die Größe der von den Muskeln hervorgebrachten Raddrehungswinkel erkennen.

Andere Diagramme zur Veranschaulichung der den Augenmuskeln zukommenden Wirkungen sind von WINTERNITZ[3], ZOTH[4] und ELSCHNIG[5] angegeben worden.

Als ein weiterer Demonstrationsapparat mag ferner hier das Modell er-

---

[1] MOTAIS, *Anatomie de l'appareil moteur de l'oeil* 1887.

[2] LANDOLT, *Transactions of the Ophth. Society* XII. (1894). — AUBERT, Zeitschrift f. Instrumentenkunde VII. (1887). — DONDERS, Archiv f. Ophth. XVI. 1870. — BOWDITCH, *Journal of the Boston-Society of med. Sc.* II. (1898). — BROWNING, Archiv f. Augenheilkunde XI. (1881). S. 69.

[3] WINTERNITZ, Wiener klin. Wochenschrift 1889.

[4] ZOTH, Die Wirkungen der Augenmuskeln. Wien 1897.

[5] ELSCHNIG, Wiener klin. Wochenschrift 1902. Nr. 11.

wähnt werden, dessen ich mich seit langer Zeit bediene, um die Projektion eines ursprünglich horizontalen Nachbilderkreuzes bei Drehung um senkrechte, horizontale und geneigte frontale Achsen, namentlich die Entstehung der von Null verschiedenen Raddrehungswinkel im letzteren Falle zu demonstrieren. Es besteht in einer das Auge darstellenden hohlen Messingkugel, die in ihrem in der Frontalebene liegenden Äquator und zwar oben und unten, rechts und links sowie in der Mitte zwischen diesen Stellen 8 um je 45° voneinander abstehende kurze Ansatzröhrchen trägt. Zur Befestigung der Kugel und zu ihrer Drehung um bestimmte Achsen dient ein fester, von einer Säule getragener, kreisförmiger Messingring, der ebenfalls in Abständen von je 45° jenen Röhrchen korrespondierende Löcher besitzt. Steckt man passende Zapfen durch zwei gegenüberliegende dieser Öffnungen in die ihnen entsprechenden Röhrchen, so kann man das Augenmodell um die durch diese bestimmte Achse drehen, somit nach Belieben um eine senkrechte, horizontale oder von links oben nach rechts unten oder von rechts oben nach links unten verlaufende. Will man die Kugel fixieren, so hat man nur nötig, noch einen weiteren Zapfen einzustecken. Um nun eine Projektion der Nachbilder zu veranschaulichen, trägt die Kugel an ihrem vorderen Pol ein Ansatzrohr, in dem, um einige Zentimeter verschieblich, eine Sammellinse angebracht ist, während am hinteren Pol ein Kreuz von Platindrähten angebracht ist, das durch einen Strom von passender Stärke glühend gemacht wird. Man projiziert vermittelst der Sammellinse das Bild des Platindrahtkreuzes auf eine Tafel und kann nun, indem man die Kugel um die verschiedenen Achsen dreht, leicht veranschaulichen, wie das Kreuz sich auf der Tafel abbildet[1]. Macht man, was sich empfiehlt, die Drehungen ziemlich beträchtlich, so ist es nicht einmal nötig, die Tafel mit einem Gitter horizontaler und vertikaler Streifen zu versehen, da die schiefwinklige Projektion des Kreuzes, insbesondere auch die Abweichung des ursprünglich horizontalen Teils von den Horizontallinien der Tafel, also die Raddrehungswinkel ohne solche erkennbar genug sind. Die optischen Verhältnisse entsprechen, wie man sieht, den bei den Nachbildversuchen gegebenen vollkommen.

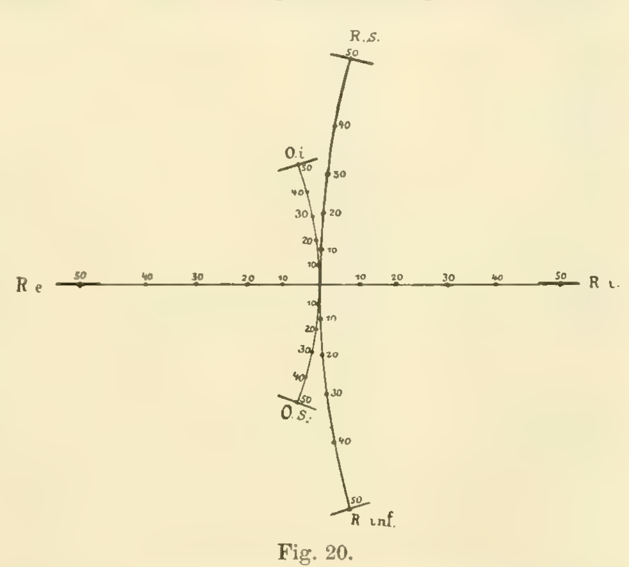


Fig. 20.

14. Wir haben an dieser Stelle noch den Bericht über einige Untersuchungen anzuschließen, die sich auf gewisse, in obigem noch nicht berücksichtigte

[1] Da hierbei das Bild auf Stellen des Schirms aufgefangen wird, die einen etwas größeren Abstand vom Modell besitzen, so ist es nötig, damit die Bilder scharf bleiben, die abbildende Linse ein wenig zu verschieben.

Modalitäten der Augenbewegungen beziehen. Von LAMANSKI[1] wurde (unter Anleitung von HELMHOLTZ) die Geschwindigkeit der Augenbewegungen ermittelt. Es geschah dies mit Hilfe eines in bekanntem Rhythmus intermittierenden Lichtes. Ist ein solches im Gesichtsfeld vorhanden, während der Blick von einer zu einer andern Marke läuft, so entwickelt sich eine Anzahl getrennter Nachbilder; ihr Abstand voneinander ist um so größer, ihre gesamte Zahl um so kleiner, je schneller die Bewegung des Blicks vor sich geht. Ist α der Winkelabstand zweier Nachbilder, p die Periode der Lichtintermittierung, so ist α/p die Winkelgeschwindigkeit des Auges. Für α kann annähernd s/n gesetzt werden, wo s die ganze von den Nachbildern eingenommene Strecke und n die Zahl der Nachbilder ist. LAMANSKI fand hierbei Geschwindigkeiten, die sich zwischen 1,883 und 4,091 mal 360° pro Sekunde bewegen. Durchschnittlich war die Geschwindigkeit bei horizontaler Bewegung etwas größer als bei senkrechter und den schrägen. Ohne merkbaren Einfluß war es, ob der Kopf gerade oder nach vorn oder nach hinten geneigt war.

Weitere Bestimmungen über die Geschwindigkeit der Blickbewegung sind ferner von BRÜCKNER[2] (gleichfalls mit der Nachbildmethode), von GUILLERY[3] nach einem andern Verfahren (mit Benutzung rotierender Scheiben) und von HOWE[4] ausgeführt worden. Aus den Ergebnissen des Erstgenannten sei hier erwähnt, daß die Anfangsgeschwindigkeit einer Blickbewegung merklich größer gefunden wird, wenn eine sehr umfangreiche als wenn eine nur geringe Blickbewegung intendiert wird.

In noch größerem Umfange fand GUILLERY die Geschwindigkeit der Blickbewegung von einer Reihe von Modalitäten abhängig. Nach seinen Beobachtungen ist bei ausgiebigen Bewegungen die Geschwindigkeit im mittleren Teile der Bahn größer, als in den Anfangs- und Endstrecken. Ferner werden bei monokularer Beobachtung die Einwärtsbewegungen schneller als die auswärts gerichteten ausgeführt. Dementsprechend bleiben die binokular kontrollierten Bewegungen überhaupt an Geschwindigkeit hinter den höchsten monokularen Werten zurück.

LAMANSKI bemerkte ferner bei seinen Versuchen, daß, wenn der Blick von der zunächst fixierten auf eine zweite (zunächst exzentrisch wahrgenommene) Marke gewendet wird, er nicht immer auf dem kürzesten Wege von der Anfangs- zur Endstellung geführt wird. Dies wird dadurch erkennbar, daß die Nachbilder nicht in einer Geraden liegen. Bei horizontaler und vertikaler Bewegung gelang es nach einiger Übung, die Nachbilder in eine gerade Linie zu bekommen. Bei schrägen Bewegungen bildeten sie dagegen, wie dies ähnlich auch schon von WUNDT angegeben worden war[5], gekrümmte Linien (für die schräg nach innen gerichteten Bewegungen nach innen, für die schräg nach außen gerichteten Bewegungen nach außen konkav). Eingehendere Untersuchungen speziell über diese Modalitäten der Augenbewegung sind später auch von

[1] LAMANSKI, PFLÜGERS Archiv II. S. 418. 1869.

[2] BRÜCKNER, Über die Anfangsgeschwindigkeit der Augenbewegungen. PFLÜGERS Archiv XC. 1902. S. 73.

[3] GUILLERY, PFLÜGERS Archiv LXXIII. 1898. S. 87.

[4] HOWE, Über die Schnelligkeit der seitlichen Augenbewegungen. Archiv für Augenheilk. LI. 1904. S. 51.

[5] WUNDT, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. 1862. S. 202.

Herz[1] angestellt worden, der die von einem dauernd sichtbaren Licht entwickelten Nachbildlinien untersuchte.

Eine direkte Aufzeichnung der Augenbewegungen gelang Delabarre[2] und Orschansky[3]. Beide setzten auf die mit Cocain unempfindlich gemachte Hornhaut leichte, genau anschließende Schalen aus Glas oder Metall. Die Bewegung dieser Schalen konnte durch Fäden auf eine Schreibeinrichtung übertragen oder auch vermittelst eines an ihnen angebrachten Spiegelchens durch Projektion sichtbar gemacht werden. K.

---

§ 28. Das monokulare Gesichtsfeld.

Bei dem gewöhnlichen Gebrauche unserer Augen sehen wir mit ihnen beiden zugleich, indem wir sowohl sie selbst im Kopfe hin und herbewegen, als auch von Zeit zu Zeit unsern Kopf und unsern ganzen Körper im Raume seinen Ort wechseln lassen. Dabei pflegen wir die Augen in der Weise herumschweifen zu lassen, daß beide bald diesen, bald jenen Punkt der vor uns liegenden Objekte fixieren, das heißt, beide sich so wenden, um das Bild des fixierten Punktes gleichzeitig auf den Zentren der Netzhäute zu empfangen. Indem wir die Augen so gebrauchen, sind wir imstande, richtige Wahrnehmungen des Ortes derjenigen gesehenen Gegenstände zu gewinnen, von denen das Licht ungestört in seinem geradlinigen Wege zu unserem Auge gelangt.

In der Tat läßt sich nach den im zehnten Paragraphen erörterten Gesetzen der Lichtbrechung im Auge einsehen, daß wenn bekannt ist die Stellung des Körpers und des Kopfes, ferner die Stellung beider Augen im Kopfe, und somit auch die Lage ihrer Knotenpunkte, endlich die Orte der beiden Netzhäute, welche von den Bildern desselben leuchtenden Punktes getroffen werden, daß dann auch eindeutig bestimmt werden kann der Ort, wo der leuchtende Punkt sich wirklich befindet. Denn man ziehe von dem Netzhautbilde jedes Auges eine gerade Linie durch den Knotenpunkt, und verlängere sie. Beide Richtungslinien werden sich nur in einem Punkte schneiden können, und nur in diesem Punkte wird sich das leuchtende Objekt befinden können.

Von der Genauigkeit der einzelnen oben geforderten Bestimmungen wird es übrigens abhängen, mit welcher Genauigkeit der Ort des gesehenen Objekts im Raume wirklich bestimmt wird.

Wenn also gegeben sind:

1. Empfindungen, welche genügen, um eine richtige Kenntnis zu gewinnen von der Stellung unseres Körpers und Kopfes gegen eine beliebig für die Abmessungen gewählte Grundlage, z. B. den Fußboden, auf dem wir stehen,
2. Empfindungen, welche zu einem richtigen Urteil über die Stellung unserer Augen im Kopfe genügen,

---

[1] Herz, Pflügers Archiv XLVIII. S. 385. 1891.

[2] Delabarre, *A method of recording eye-movements. American Journal of psychology.* IX. S. 572. 1897.

[3] Orschansky, Eine neue Methode die Augenbewegungen direkt zu untersuchen. Zentralblatt f. Physiologie. XIII. 1898. S. 785.

3. Momente in der Empfindung (sogenannte Lokalzeichen), durch welche wir die Reizung der von dem Lichte des Objektpunktes A gereizten beiden Netzhautstellen von der Reizung aller anderen Netzhautstellen unterscheiden können (von welcher Art diese letzteren sind, darüber wissen wir gar nichts; daß dergleichen da sein müssen, schließen wir eben nur aus dem Umstande, daß wir Lichteindrücke auf verschiedenen Teilen der Netzhäute zu unterscheiden vermögen),

so ist hinreichendes Material gegeben, um den Ort des Punktes A im Raume unzweideutig daraus bestimmen zu können. Befände sich der Punkt A an irgend einem andern Orte des Raumes, so würde er ein anderes Aggregat von Empfindungen erregen müssen. Die Erfahrung lehrt nun, daß wir im allgemeinen auch wirklich durch das Gesicht die Orte der gesehenen Objektpunkte richtig bestimmen können. Die Genauigkeit dieser Bestimmung ist freilich eine wechselnde und hängt namentlich davon ab, wie nahe in beiden Augen die Bilder des Punktes A dem Zentrum der Netzhautgrube liegen.

Wir werden nun also zu untersuchen haben, wieviel die genannten Momente der Empfindung einzeln genommen zu der genauen Wahrnehmung des Ortes der Objekte beitragen. Wir werden dabei nicht weiter untersuchen, von welchen Empfindungen die Beurteilung der Stellung des Körpers zum Fußboden und des Kopfes zum Körper abhängig ist; die Untersuchung darüber gehört in die Physiologie der Sinneswahrnehmungen überhaupt, nicht in die des Gesichtssinnes. Wir nehmen also an, daß die Stellung des Kopfes gegen die zugrunde gelegte Basis der räumlichen Abmessungen in jedem Falle genau bekannt sei. Dann bleibt also zu untersuchen, wieviel zur Erkenntnis des Ortes der Objekte beitragen

1. Bewegungen des Kopfes,
2. Bewegungen der Augen im Kopfe,
3. Sehen mit einem Auge,
4. Sehen mit beiden Augen.

Wir beginnen unsere Untersuchung damit, daß wir feststellen, was beim Gebrauche nur eines Auges und beim Ausschluß aller Bewegungen des Kopfes erkannt werden könne. Die Bewegungen des betreffenden Auges im Kopfe dagegen werden in dem vorliegenden Abschnitte im allgemeinen nicht ausgeschlossen.

Zunächst ist klar, daß wenn gegeben ist Ort und Stellung eines Auges, und der Ort des Netzhautbildes eines leuchtenden Punktes, für den das Auge akkommodiert ist, so können wir von seinem Netzhautbilde eine gerade Linie durch den Knotenpunkt des Auges ziehen, und wissen zunächst, daß der leuchtende Punkt vor dem Auge in dieser Linie liegen müsse. In welchem Punkte dieser Linie er aber liege, bleibt notwendig unbekannt, wenn wir keine anderen Hilfsmittel zur Entscheidung darüber haben. Zwar könnte man an die Akkommodation des Auges denken. Wäre das Auge möglichst gut für den Punkt akkommodiert, so würde möglicherweise der Grad der Akkommodationsanstrengung, oder die Größe des vorhandenen Zerstreuungskreises Aufschluß über die Entfernung geben können. Wir werden im § 30 untersuchen, welche Hilfsmittel beim monokularen Sehen für die Beurteilung der Entfernung noch vorhanden sind, und dabei sehen, daß die Akkommodation in der Tat ein außerordentlich unvollkommenes Hilfsmittel für die Beurteilung der Entfernung ist.

Wenn wir also von den kleinen Unterschieden in der Schärfe des Bildes absehen, welche durch wechselnde Akkommodation hervorgebracht werden können, so ist kein anderes Moment in der Empfindung vorhanden, welches darüber Aufschluß gäbe, in welcher Entfernung der leuchtende Punkt liegt.

Oben wurde vorausgesetzt, das Auge sei genau akkommodiert für den leuchtenden Punkt. Dann können wir, um seine Richtung zu finden, von seinem Netzhautbilde, wie oben vorgeschrieben ist, die gerade Richtungslinie durch die Knotenpunkte ziehen, oder aber auch jedem anderen Strahle folgen, der von irgend einem Punkte der Pupille nach dem Netzhautbilde hinläuft. Wenn wir die Brechung eines solchen Strahls nach den im zehnten Paragraphen gegebenen Regeln richtig konstruieren, um seinen Weg vor dem Auge zu finden, wird uns jeder solcher Strahl schließlich zu dem leuchtenden Punkte zurückführen, von dem er ausgegangen ist. In diesem Falle bleibt es also gleichgültig, welchen von den in die Pupille gefallenen Strahlen wir wählen, um die Richtung zu bestimmen, in welcher der leuchtende Punkt liegt.

Dies ist aber nicht mehr gleichgültig, wenn wir auf der Netzhaut Bilder von leuchtenden Punkten haben, für welche das Auge nicht ganz genau akkommodiert ist. In solchen Fällen dürfen wir den Mittelpunkt des Zerstreuungskreises als den Ort des Netzhautbildes betrachten[1]. Der Strahl aber, welcher von dem leuchtenden Punkte nach der Mitte des eventuellen Zerstreuungskreises hingeht, geht, wie schon oben Bd I, S. 104 bemerkt, durch den Mittelpunkt der Pupille und ist mit dem Namen einer Visierlinie belegt worden. Wenn sich der leuchtende Punkt längs dieser Visierlinie hin und her bewegen würde, so würde sich in der Empfindung nichts verändern, als daß das Zerstreuungsbild desselben kleine Vergrößerungen und Verkleinerungen erlitte, welche selbst bei sehr bedeutendem Wechsel der Entfernung unmerklich klein sein könnten.

Es läßt sich ferner zeigen, daß auch durch eintretende Akkommodation des Auges für die Nähe der Mittelpunkt der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut seinen Ort nicht merklich verändert. Die darauf bezügliche Rechnung wird am Ende dieses Paragraphen gegeben werden.

Um nun zur Anschauung zu bringen, was wir mit einem Auge ohne Hilfe von Bewegungen des Kopfes und ohne Berücksichtigung der Akkommodationsunterschiede von der Außenwelt erkennen können, dazu sind namentlich sehr weit entfernte Gegenstände als Gesichtsobjekte die passendsten Beispiele. Denn bei sehr weit entfernten Objekten bringen mäßige Bewegungen unseres Kopfes keine andere Veränderung des Bildes hervor, als wir auch durch Drehungen des Auges allein hervorbringen können. Ja, beim Anblick unendlich entfernter Objekte ist es sogar gleichgültig, ob wir das zweite Auge ebenfalls öffnen, oder nicht. Denn der Gebrauch des zweiten Auges gibt uns nur dann ein neues verwertbares Moment der Empfindung, wenn die in ihm gezogene Visierlinie die des ersten Auges irgendwo in einer meßbaren Entfernung schneidet. Wenn beide Linien merklich parallel sind und nebeneinander in unabsehbare Entfernung hinauslaufen, so gibt uns das keinen Aufschluß über die wirkliche Entfernung des leuchtenden Objektes, außer dem negativen, daß es jenseits einer gewissen Grenze der Entfernung liegen muß.

[1] Es ist hier nur von leuchtenden Punkten die Rede; daß es sich an den Rändern leuchtender Flächen anders verhält, ist bei der Lehre von der Irradiation § 21 auseinandergesetzt.

Betrachten wir weit entfernte irdische Gegenstände, so kann uns die früher gewonnene Bekanntschaft mit ihrer wirklichen Form und Entfernung, Farbe usw. noch mancherlei Hilfe in der Deutung unseres Gesichtsfeldes gewähren. Wollen wir uns von allen diesen Hilfsmitteln früherer Erinnerung frei machen, so bietet sich uns ein Objekt dar, was für diese Untersuchung in ausgesuchter Weise paßt, nämlich der gestirnte Himmel. An dem finden wir Objekte, von deren Form, Größe und Entfernung uns durchaus keine frühere Anschauung unterrichtet hat, für deren Wahrnehmung der Gebrauch beider Augen und die etwa von uns ausgeführten Bewegungen durchaus nicht weitere sinnliche Momente gewähren, als ein einzelnes Auge gewähren kann, dessen Ort im Raume unverändert bleibt.

Unter diesen Umständen erscheinen uns die Objekte, welche in der Tat im Raume nach drei Dimensionen verteilt sind, nur noch nach zwei Dimensionen ausgebreitet. Wir sind nur noch imstande, die Richtung der Visierlinie zu erkennen, die zu jedem einzelnen gesehenen Punkte hinführt. Eine solche Richtung braucht zu ihrer Festsetzung nicht mehr drei Bestimmungsstücke, wie ein Punkt, sondern nur zwei; wie denn auch die Sterne in ihrer Lage bestimmt werden durch je zwei Winkel, entweder ihre Länge und Breite im Verhältnis zum Pol und Äquator, oder ihre Rektaszension und Deklination im Verhältnis zur Ekliptik.

Eine Raumgröße von zwei Dimensionen ist eine Fläche; in einer solchen ist die Lage der Punkte festgestellt durch je zwei Bestimmungsstücke. Wenn wir also beim Sehen mit einem Auge, dessen Drehpunkt seinen Ort im Raum nicht wechselt, die eine Dimension, die Entfernung nicht zu unterscheiden vermögen, so können wir die Objekte nicht mehr im Raume, sondern nur noch wie an einer Fläche verteilt sehen. Diese scheinbare flächenartige Anordnung der gesehenen Objekte nennen wir das G e s i c h t s f e l d. So sehen wir z. B. die Sterne an der imaginären Fläche des Himmelsgewölbes verteilt.

Ich bitte den Leser darauf zu achten, daß ich nicht gesagt habe, die Gegenstände erschienen uns a n oder a u f e i n e r F l ä c h e verteilt, sondern nur w i e a n e i n e r F l ä c h e, in flächenartiger Anordnung, in einer nach zwei Dimensionen unterschiedenen Anordnung. In der Tat stellen wir uns nicht notwendig eine bestimmte Fläche in bestimmter Entfernung vor, an der die Sterne oder die fernen Berge des Horizonts angeheftet wären, wenn auch das eherne Himmelsgewölbe und die kristallinischen Sphären der alten Zeit der natürliche Ausdruck für eine kindlichere Art der Anschauung sind, in der man alles recht greifbar zu machen suchte. Es ist dadurch manche Schwierigkeit in die physiologische Optik gekommen, daß man glaubte, in jedem Falle eine bestimmte Fläche, meist eine Kugelfläche, als das zeitweilige Gesichtsfeld jedes Auges annehmen zu müssen. Man kann sich jede Funktion von zwei Variablen auf einer Fläche darstellen. So haben wir im 20. Paragraphen die Farben gleicher Helligkeit nach gewissen Regeln auf der Farbenscheibe dargestellt. Die beiden Variablen, nach denen die Farbe sich unterscheidet, sind hierbei der Farbenton und der Sättigungsgrad gewesen. Gehen wir durch eine kontinuierliche Reihe von Farbentönen von einer Anfangsfarbe aus und zu derselben wieder zurück (das heißt, ziehen wir eine geschlossene Linie in der Farbenscheibe), so zerfällt dadurch die Gesamtheit der Farben in zwei vollständig getrennte Gruppen (die außerhalb und innerhalb jener Linie dargestellt sind), und wir können nicht von einer Farbe der einen Gruppe kontinuierlich zu einer

der andern Gruppe übergehen, ohne durch eine der zuerst berührten Farben (die in der geschlossenen Linie liegen) hindurchzugehen. Dies letztere ist nun auch die Charakteristik einer einfach zusammenhängenden Fläche; jede geschlossene Linie, die wir in ihr ziehen, teilt sie in zwei Teile, und wir können nicht von einem Punkte des einen Teils zu einem des andern in der Fläche übergehen, ohne durch jene geschlossene Linie durchzugehen. Eben wegen dieser Analogie machen wir uns das System der Farben anschaulich, indem wir sie auf einer Fläche ausgebreitet darstellen, und mehr will es zunächst auch nicht sagen, wenn wir die Objekte auf die imaginäre Fläche des Gesichtsfeldes, deren Ort im Raume übrigens ganz unbestimmt bleibt, entwerfen.

Übrigens ist auch leicht einzusehen, daß diese Anschauung einer flächenhaften Verteilung der Gegenstände im Gesichtsfelde auch da erhalten bleiben muß, wo wir gleichzeitig mit ihr vollständig genaue und richtige Anschauungen der wirklichen Verteilung der Objekte im Raume durch unsern Gesichtssinn haben. Denn immer wird die Eigentümlichkeit in der Anschauung stehen bleiben, daß, wenn ich mit dem Blicke eine geschlossene Linie im Gesichtsfelde durchlaufen habe, ich von einem inneren zu einem äußeren Punkte den Blick nicht überführen kann, ohne jene geschlossene Linie zu durchschneiden. Wenn ich den Umfang eines Fensters mit dem Blick umschrieben habe, kann ich von einem Objekte, welches ich außerhalb des Fensters sehe, nicht zu einem Objekte an den Wänden des Zimmers übergehen, ohne mit dem Blicke über den Rand des Fensters zu streifen, und dadurch ist das wesentliche Kennzeichen einer flächenartigen Anordnung der gesehenen Objekte gegeben, obgleich wir andererseits sehr wohl wissen, daß im wirklichen Raume unendlich viele Linien von jenem äußeren Punkte zu dem an der Zimmerwand gezogen werden können welche die Umgrenzungslinie des Fensters durchaus nicht schneiden.

Eben weil wir in dieser Weise mit dem Blicke über die Gesichtsobjekte hinstreifend dieselben in einer flächenhaften Anordnung finden, ist es nun auch möglich, ihren Anblick durch flächenhafte Zeichnungen und Gemälde dem Auge zurückzurufen. Der Zeichner, welcher eine Landschaft abbilden will, bemüht sich nicht zu ermitteln, wie weit jeder Punkt der Landschaft von seinem Auge oder von einem anderen Punkte der Landschaft wirklich entfernt ist, sondern nur, ob er von dem ersten aus den Blick nach oben oder unten, nach rechts oder links wenden muß, und welche Exkursion sein Auge etwa machen muß, um zu dem zweiten hinzugelangen. Das flächenhafte Bild wird von uns als ähnlich dem körperlichen Objekte anerkannt, wenn wir dieselben Bewegungen unseres Auges ausführen müssen, um von einem zum andern Punkte des Bildes zu gelangen, welche nötig wären, um die entsprechenden Punkte des Objekts nacheinander zu erblicken.

Es ist weiter ersichtlich, daß wir auf diesem einfachen Wege auch die Anordnungsweise der Punkte in der scheinbaren Fläche des Gesichtsfeldes kennen lernen können, zunächst abgesehen von allen Größenbestimmungen.

Was darunter zu verstehen ist, wird am leichtesten ersichtlich, wenn man sich ein flächenhaftes Bild auf eine dehnbare Kautschukplatte aufgetragen denkt. Diese kann man nachher beliebig ausrecken, und alle Längenverhältnisse zwischen ihren einzelnen Teilen, so wie die Winkel zwischen den einzelnen Linien der Größe nach beliebig ändern, doch wird trotz aller Veränderungen jede geschlossene Linie, die durch dieselbe Reihe von Punkten des Bildes gezogen ist, immer denselben unveränderlichen Satz von anderen Bildpunkten in sich ein-

schließen und die andere Hälfte ausschließen, und in jeder kontinuierlichen linienförmigen Reihe von Punkten des Bildes wird die Reihenfolge der Punkte unverändert bleiben, so sehr auch die Größe und Form der einzelnen Teile einer solchen Linie sich verändert. Ebenso ist die Anordnungsweise der Punkte auf einer ebenen geographischen Karte und einem Erdglobus dieselbe, trotzdem daß die Größenverhältnisse auf der ebenen Karte nicht genau denen auf dem Globus entsprechen können, um so weniger, ein je größeres Stück der Erdoberfläche dargestellt ist.

Wenn wir zwei Flächen haben, und die Punkte der einen denen der anderen in einer festgesetzten Weise entsprechen, so nenne ich die Ordnung der Punkte auf beiden Flächen gleichartig, so oft allen solchen Reihen von Punkten der ersten Fläche, die in einer kontinuierlichen Linie liegen, solche Punkte der anderen entsprechen, die ebenfalls in einer kontinuierlichen Linie liegen, und wenn die Reihenfolge der Punkte in der ersten Linie dieselbe ist, wie die Reihenfolge der entsprechenden Punkte in der zweiten Linie.

Indem wir den Blick über das Gesichtsfeld schweifen lassen, finden wir unmittelbar in der Wahrnehmung, in welcher Ordnung die Objektpunkte im Gesichtsfelde aufeinander folgen, so daß zunächst wenigstens die Ordnung der Punkte im Gesichtsfelde durch solches Herumblicken unmittelbar bestimmt werden kann.

Wie und inwieweit die Größenverhältnisse durch das Augenmaß bestimmt werden können, wollen wir nachher untersuchen. Hier ist zunächst nur noch zu bemerken, daß wenigstens das Auge des Erwachsenen die Ordnung der Punkte im Gesichtsfelde nicht nur an Objekten bestimmt, über welche der Blick schweifen kann, sondern daß wir ein bestimmt flächenhaft geordnetes Bild auch von solchen Objekten und Erregungen haben, die in bezug auf unsere Netzhaut ihren Ort nicht wechseln und sich mit unserem Auge bewegen. Dies gilt für die Nachbilder, die Netzhautgefäße, die Polarisationsbüschel und überhaupt für die meisten subjektiven Erscheinungen. Wie wir auch das Auge bewegen mögen, immer wird derselbe Punkt eines solchen subjektiven Bildes dem Fixationspunkte entsprechen, und wir können nie verschiedene Teile des Bildes nacheinander auf der Mitte unserer Netzhaut wechseln lassen. Daraus folgt, daß wir imstande sind, die Ordnung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde auch zu beurteilen nach dem bloßen Eindruck, den das ruhende Netzhautbild auf die ruhende Netzhaut macht, ohne daß wir nötig haben, jedes einzelne Mal durch Bewegungen zu kontrollieren, welches die Reihenfolge der einzelnen Objektpunkte sei.

Um diese Tatsache zu erklären, kann die Annahme gemacht werden und ist von den Anhängern der nativistischen Theorie gemacht worden, daß wir eine angeborene Kenntnis der Ordnung der Netzhautpunkte auf unserer Netzhaut (und auch wohl der Größe ihrer Abstände) besitzen, welche uns unmittelbar in den Stand setzt, wahrzunehmen, welche Punkte des Netzhautbildes kontinuierlich aneinanderstoßen, welche nicht. Wenn eine solche Annahme gemacht wird, so ist damit natürlich jede weitere Erörterung über den Ursprung unserer flächenhaften Gesichtsbilder abgeschnitten.

Andererseits ist ersichtlich, daß die Fähigkeit, auch ohne Bewegung des Auges die Ordnung der Objekte im Gesichtsfelde zu erkennen und zu beurteilen, auch erworben sein kann, wie dies die empiristische Theorie der Gesichtswahrnehmungen annimmt. Denn jedes Mal, wo wir durch Bewegungen des

Auges die Ordnung der Teile eines ruhenden Objekts bestimmt haben, erhalten wir auch, solange wir einen seiner Punkte ruhig fixieren, einen ruhenden Eindruck seiner verschiedenen Teile auf unsere Netzhaut, und können somit durch Erfahrung kennen lernen, wie zwei Punkte, die wir durch Bewegung des Auges als benachbart erkannt haben, sich im ruhenden Bilde des Auges darstellen, das heißt also, anatomisch gesprochen, wir können durch Erfahrung kennen lernen, welche Lokalzeichen der Gesichtsempfindungen benachbarten Netzhautfasern angehören, und wenn wir dies gelernt haben, werden wir imstande sein, auch aus dem unveränderten Eindruck eines relativ zum Auge ruhenden Objekts die Anordnung der Punkte im Gesichtsfelde zu erkennen.

Wir werden also im folgenden zu prüfen haben, ob ohne die Hypothese von der angeborenen Kenntnis der Anordnung der Netzhautpunkte die Tatsachen sich erklären lassen aus den bekannten Fähigkeiten des Sinnengedächtnisses. Direkte Versuche über diese Frage an neugeborenen Kindern lassen sich natürlich nicht anstellen, und die Erfahrungen an operierten Blindgeborenen ergeben hierüber so gut wie nichts, da diese operierten sogenannten Blinden fast immer Staarkranke waren, welche durch ihre getrübte Linse allerdings sehr wenig zu sehen, aber doch die Richtung des stärkeren Lichts noch zu erkennen imstande waren, und also der Erfahrungen über die Lokalisation ihrer Netzhauteindrücke nicht ganz entbehrten. In dieser Beziehung würden Fälle von angeborener Verschließung der Pupille, die durch künstliche Pupillenbildung geheilt wurden, wo dergleichen vorkommen, viel wichtiger sein, als die Erfahrungen an operierten Staarkranken. Einige merkwürdige Fälle dieser Art sind am Ende dieses Abschnitts erwähnt.

Wir erkennen nun aber nicht bloß die Ordnung der Objektpunkte im Gesichtsfelde in dem allgemeinen Sinne, wie es bisher besprochen ist, sondern wir erkennen auch bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit die G r ö ß e n - v e r h ä l t n i s s e der Linien und Winkel. Der Zeichner, welcher sich bemüht, den Eindruck der körperlichen Objekte durch ein flächenhaftes Bild wiederzugeben, darf nicht bloß darauf ausgehen, die Punkte des Objekts in der Reihenfolge auf seiner Zeichnung zu ordnen, wie unser Blick sie trifft, wenn er über sie hinschweift; er muß auch streben, gewisse Größenverhältnisse einzuhalten zwischen den Abständen der einzelnen Punkte, damit wir die flache Zeichnung dem körperlichen Objekte ähnlich finden, und wenn wir eine Zeichnung auf einem Kautschukblatte ausführen und sie verschiedentlich ausrecken, so ändert sich ihr Anblick für unser Auge, trotzdem die Anordnung der Punkte in der Fläche dieselbe bleibt.

Um nun die auf die Beurteilung der Größenverhältnisse bezüglichen Tatsachen unzweideutig auseinandersetzen und ihrem Ursprunge nachforschen zu können, müssen wir noch einige Festsetzungen über die Flächen, auf welche wir uns die Bilder des Gesichtsfeldes projiziert denken wollen, vorausschicken.

Man braucht den Namen des Gesichtsfeldes in der Regel für die Erscheinung der vor uns liegenden Gesichtsobjekte, solange man nicht auf ihre Entfernung von uns, sondern nur auf ihre scheinbare flächenhafte Anordnung nebeneinander achtet, ohne dabei bestimmt festzusetzen, ob die Objekte mit festgehaltenem oder mit schweifendem Blicke, oder vielleicht selbst mit Hilfe von Bewegungen unseres Kopfes und Körpers betrachtet werden sollen. In der nun folgenden Analyse unserer Wahrnehmungen wird es aber nötig, diese verschiedenen Fälle voneinander deutlich zu trennen. Der unbestimmte Name des G e s i c h t s f e l d e s

mag beibehalten werden, wo es auf eine solche Unterscheidung des bewegten und unbewegten Auges nicht ankommt, oder wo zusammengegriffen werden soll, was sowohl das bewegte, wie das unbewegte Auge wahrnimmt, wie wir denn auch mit dem Worte Gesicht den ganzen Sinn in allen seinen Anwendungen verstehen. Dagegen habe ich schon im vorigen Paragraphen mit Blickfeld dasjenige Feld bezeichnet, über welches der Blick des bewegten Auges hinlaufen kann. Dementsprechend betrachte ich das Blickfeld als eine Fläche, die fest mit dem Kopfe verbunden ist, mit diesem sich bewegt, und in welchem ein Punkt, der Blickpunkt oder Fixationspunkt von einem, beziehlich beiden Augen so betrachtet wird, daß er sich auf dem Zentrum der Netzhautgrube abbildet. Die Richtungen oben und unten, rechts und links werden im Blickfelde nach den entsprechenden Richtungen des Kopfes genommen. Ein Punkt des Blickfeldes ist ausgezeichnet dadurch, daß er der Fixationspunkt des entsprechenden Auges in seiner Primärstellung ist; wir wollen ihn den Hauptblickpunkt (primären Fixationspunkt) nennen. Den gerade gegenüberliegenden, hinter dem Kopfe des Beobachters gelegenen Punkt, welcher das andere Ende des nach dem Hauptblickpunkt gerichteten Durchmessers des Blickfeldes bildet, nennen wir, wie oben, den Occipitalpunkt. Im Kopfe bestimmt für unsere Zwecke die Verbindungslinie der Drehpunkte beider Augäpfel die horizontale Richtung von rechts nach links. Legen wir durch die genannte Verbindungslinie und den Hauptblickpunkt eine Ebene, so ist diese die horizontale Meridianebene des Blickfeldes, oder die Primärlage der Blickebene. Die übrigen Meridianebenen des Blickfeldes werden durch die Verbindungslinie des Hauptblickpunkts und des Drehpunkts des betreffenden Auges gelegt. Die Schnittlinien der Meridianebenen mit der imaginären Fläche des Blickfeldes sind die Meridiane dieses Feldes. Wenn beide Augen gebraucht werden, kann von Meridianebenen nicht gesprochen werden, außer von der horizontalen, wohl aber von Meridianlinien, weil das Blickfeld so unendlich weit entfernt gedacht werden kann, daß die Richtung der Ebenen, welche durch einen Punkt des Blickfeldes und die Gesichtslinie des einen oder andern Auges gelegt sind, nicht merklich verschieden ist.

Ruhende äußere Objekte wechseln also ihren Platz im Blickfelde, wenn sich der Kopf bewegt; dieselbe Stelle des Blickfeldes wird nacheinander auf verschiedenen Stellen der Netzhaut abgebildet, wenn sich das Auge bewegt. Dagegen verlangt Fixation derselben Stelle des Blickfeldes unausbleiblich immer dieselbe Stellung des Auges im Kopfe, und dieselben Verkürzungen, beziehlich Verlängerungen der einzelnen Augenmuskeln, so daß, wie wir vermuten dürfen, jede Stelle des Blickfeldes mehr oder weniger genau bezeichnet ist durch die besonderen Innervationsgefühle und sonstige etwa vorhandenen Empfindungen der Nachbarteile des Auges, welche zu der betreffenden Stellung des Auges im Kopfe gehören.

Wir können das Blickfeld zum Zwecke seiner geometrischen Ausmessung als eine Kugelfläche von unendlich großem Radius betrachten, ähnlich dem Himmelsgewölbe, deren Mittelpunkt im Drehpunkte des Auges gelegen ist. Der Ort eines gesehenen Punktes im Blickfelde wird gefunden, wenn man durch ihn und den Drehpunkt des Auges eine gerade Linie legt und diese bis zur imaginären Fläche des Blickfeldes verlängert denkt. Wo sie die Fläche des Blickfeldes schneidet, ist der geometrische Ort des gesehenen Punktes im Blickfelde, den wir in vielen Fällen zu unterscheiden haben werden von dem

scheinbaren Ort im Blickfelde, an welchen wir das gesehene Objekt nach der Schätzung vermittelst des Augenmaßes verlegen.

Vom Blickfelde, das sich auf den bewegten Blick bezieht, unterscheiden wir das Sehfeld des Auges, welches wir uns mit dem Auge zugleich beweglich denken, so daß jeder Punkt des Sehfeldes immer auf demselben bestimmten Punkte der Netzhaut abgebildet wird. Daß durch veränderte Akkommodation des Auges letzterer Punkt nicht wesentlich geändert werden kann, wird am Schluß dieses Paragraphen gezeigt werden. Das Sehfeld ist also gleichsam die nach außen projizierte Netzhaut mit ihren Bildern und ihren sonstigen Eigentümlichkeiten. Nachbilder, der Gefäßbaum, der blinde Fleck, der gelbe Fleck projizieren sich also immer in die gleichen Orte des Sehfeldes. Jeder Punkt des Sehfeldes ist deshalb bezeichnet in der Empfindung durch diejenigen Lokalzeichen derselben, welche den Empfindungen der entsprechenden Netzhautstelle angehören, und es ist schon früher hervorgehoben worden, daß wir die lokale Bestimmtheit der Empfindung irgend einer Sehnervenfaser sowohl in unseren eigenen Vorstellungen, als auch in der Mitteilung für andere gar nicht anders bezeichnen und ansprechen können, als indem wir die Stelle des Sehfeldes bezeichnen, der sie angehört.

Das Sehfeld selbst kann aber mit dem Blickpunkte seine Lage gegen das Blickfeld ändern. Um bestimmte Richtungen im Sehfeld festzusetzen, gehen wir von der Primärlage des Augapfels aus. In dieser Lage schneidet die horizontale Meridianebene des Blickfeldes das Sehfeld in einer Linie, die ich den horizontalen Meridian des Sehfeldes oder kürzer den Netzhauthorizont nennen werde. Die Meridianebenen des Sehfeldes sind durch die Hauptvisierlinie zu legen, das heißt, durch die Visierlinie, welche nach dem Blickpunkte hinläuft, und die wir wohl als mit der Blicklinie, das heißt dem Strahl, der vom Blickpunkt nach dem Drehpunkt des Auges läuft, zusammenfallend denken können, da auch der Mittelpunkt der Pupille (siehe S. 20) wie die Gesichtslinie etwas nach der Nasenseite des Auges abweicht. Der Ort eines jeden gesehenen Objekts im Sehfelde wird bestimmt durch die Visierlinie, welche durch den betreffenden Objektpunkt gezogen und bis zur Fläche des Sehfeldes verlängert ist.

Für die wissenschaftliche geometrische Ausmessung des Sehfeldes ist es am vorteilhaftesten, auch dieses als eine mit dem Blickfelde konzentrische Kugelschale zu betrachten. Daß die scheinbare Lage der Punkte im Sehfelde der geometrischen Konstruktion nicht entspricht, werden wir nachher freilich erfahren. Wir müssen demnach auch im Sehfelde einen geometrischen und einen scheinbaren Ort der Punkte unterscheiden, welcher letztere nach dem Augenmaße bestimmt wird.

Wenn sich das Auge bewegt, verschiebt sich die Kugelfläche des Sehfeldes gegen die des Blickfeldes. Gegeben ist die Lage des Sehfeldes mittels der im vorigen Paragraphen entwickelten Gesetze der Augenbewegungen, sobald die Lage des Blickpunktes, der im Sehfelde eine unveränderliche Stellung hat, im Blickfelde gegeben ist. Denkt man sich die Primärstellung des Blickpunkts und die zeitige Lage desselben durch einen größten Kreis verbunden, so muß, soweit die Augenbewegungen nach Listings Gesetze erfolgen, der horizontale Meridian des Blickfeldes und der Netzhauthorizont des Sehfeldes mit diesem Verbindungskreise gleiche Winkel machen.

Indem sich das Sehfeld gegen das Blickfeld verschiebt, bleibt der geometrische Ort für die Projektionen der einzelnen Objektpunkte in der gemeinsamen Kugel-

fläche des Blickfeldes und Sehfeldes nicht ganz unverändert. Um den Ort im Sehfelde zu finden, müssen gerade Linien vom Kreuzungspunkte der Visierlinien nach den Objektpunkten gezogen werden. Da nun der Kreuzungspunkt der Visierlinien etwa 3 mm hinter der Hornhaut und 12,9 mm vor dem Drehpunkte liegt, so verändert er seine Lage bei Drehungen des Auges, und dadurch wird die Richtung der Visierlinien ein wenig geändert. Indessen ist diese Änderung verhältnismäßig sehr unbedeutend für Objektpunkte, die dem Auge nicht ziemlich nah sind. Die Rechnung ergibt, daß die scheinbaren Verschiebungen der Objekte bei Bewegungen des Auges, welche 10 Grade nicht übersteigen, kleiner sind als die Ungenauigkeit der Bilder in dem für unendliche Ferne akkommodierten Auge, und also der Regel nach unter der Ungenauigkeit der Akkommodation verschwinden werden. Nur bei sehr nahen Objekten und bei ausgedehnten Bewegungen des Auges werden solche Verschiebungen merklich. Wenn man z. B. nahe vor das Auge einen Bleistift hält, dessen Dicke der Breite der Pupille etwa gleichkommt, und sich dadurch eine Lichtflamme vollständig verdeckt, so kann man die Lichtflamme im indirekten Sehen wahrnehmen, wenn man das Auge stark nach der Seite wendet. Dann verschiebt sich das Zerstreuungsbild des nahen Bleistiftes so stark bei der seitlichen Bewegung des Auges, daß es nun die Lichtflamme nicht mehr verdeckt. Diese Methode ist mitunter vorteilhaft anzuwenden, wenn man ermitteln will, was man im indirekten Sehen erkennen kann, weil man hierbei das Objekt direkt zu sehen gar nicht imstande ist.

Sobald also nur ferne Objekte im Gesichtsfelde sind, die alle zugleich von dem für die Ferne akkommodierten Auge ohne merkliche Undeutlichkeit gesehen werden können, so sind die Verschiebungen ihrer Projektionen in das Blickfeld verschwindend klein, und man kann den geometrischen Ort der betreffenden Objekte im Blickfelde als unabhängig von den Bewegungen des Auges betrachten.

Unter der angegebenen Einschränkung ist das Blickfeld die äußere Projektion eines unveränderlichen Netzhautbildes, das Sehfeld das der Netzhaut selbst. Das Blickfeld und Sehfeld verschieben sich bei den Bewegungen des Auges gegeneinander, wie das Netzhautbild der äußeren Objekte und die Netzhaut selbst. Ich ziehe es vor, in der folgenden Darstellung die beiden außer unserem Auge liegenden Flächen an die Stelle der Netzhaut und des Netzhautbildes treten zu lassen, weil jene ein richtigerer Ausdruck unseres tatsächlichen Bewußtseins sind, und weil bei der direkten Eintragung aller Orte in die beiden Kugelfelder die Zweideutigkeit des Ausdrucks vermieden wird, die bisher so oft in die Irre geführt hat, als wüßten wir etwas von unserer Netzhaut, deren Größe und Ausdehnung, wenn gesagt wird, daß wir die Lage der Objekte vor uns beurteilen nach der Stelle der Netzhaut, welche getroffen wird. Es ist übrigens ganz gleichgültig für alle Konstruktionen, die an den Kugelflächen gemacht werden, wie groß wir ihren Radius nehmen, nur müssen wir bei endlichem Radius die Visierlinien ersetzen durch Linien, die ihnen parallel durch den Drehpunkt des Auges gehen. So können wir den Radius der Kugelflächen auch negativ nehmen, das heißt die Kugelflächen hinter den Drehpunkt legen, wo die Netzhaut und das Netzhautbild liegen. Wir können eine solche Kugelfläche, welche in der Gegend der wirklichen Netzhaut liegt, eine ideelle Netzhaut nennen, auf der ein ideelles Netzhautbild liegt. Man muß aber nicht glauben, daß eine solche schematische Netzhaut der wirklichen in ihren Dimen-

sionen anders als in sehr grober Annäherung entspricht. Die wirkliche Netzhaut hat eine ellipsoidische Form, und das Netzhautbild der äußeren Gegenstände auf ihr ist jedenfalls durch die Asymmetrien des brechenden Apparats mannigfach verzogen. Auch halte ich für mein Teil für wahrscheinlich, daß es ganz gleichgültig für das Sehen ist, welche Gestalt, Form und Lage die wirkliche Netzhaut hat, welche Verzerrungen das Bild auf ihr erleidet, wenn es nur überall scharf ausgeprägt ist, und weder die Form der Netzhaut noch die des Bildes im Laufe der Zeit sich merklich verändert. Im natürlichen Bewußtsein des Sehenden existiert die Netzhaut gar nicht. Weder durch die Hilfsmittel der gewöhnlichen Empfindung, noch selbst durch wissenschaftliche Versuche sind wir imstande, von den Dimensionen und der Lage und Form der Netzhaut des lebenden Auges irgend etwas zu erfahren, außer was wir an ihrem optischen Bilde, welches die Augenmedien nach außen entwerfen, ermitteln können. Nur durch die Augenmedien hindurch verkehrt die Netzhaut der Regel nach mit der Außenwelt, und existiert für diese auch gleichsam nur so, wie sie in ihrem optischen Bilde erscheint. Der Repräsentant dieses optischen Bildes ist das von uns definierte Sehfeld.

Wenn zwei helle Punkte im Sehfelde vorhanden sind bei fester Stellung des Auges, so werden zwei verschiedene Sehnervenfasern durch deren Licht erregt und es entstehen zwei Empfindungen, die durch eigentümliche Lokalzeichen voneinander unterschieden sein müssen, da wir sie in der Empfindung zu unterscheiden imstande sind. Welcher Stelle der Netzhaut diese Lokalzeichen angehören, wissen wir von vornherein ebensowenig, als wo die Sehnervenfasern liegen, die sie leiten, und zu welchen Stellen des Gehirns die Erregung fortgeleitet wird. Über die Stelle der Netzhaut würden wir uns durch wissenschaftliche Untersuchungen allenfalls Aufschluß verschaffen können, über die den Sehnerven und das Gehirn betreffenden Teile der Frage sind wir dazu bis jetzt noch vollständig außerstande. Wohl aber wissen wir durch tägliche Erfahrung, wie wir den Arm ausstrecken müssen, um einen oder den andern hellen Gegenstand entweder zu berühren oder unserem Auge zu verdecken. Wir können also direkt durch solche Bewegungen die Richtung im Sehfelde ermitteln, wo sich die Objekte befinden, und wir lernen direkt die besonderen Lokalzeichen der Empfindung zu verbinden mit dem Orte im Sehfelde, in den das Objekt gehört. Dies ist auch der Grund, warum wir die Gegenstände trotz ihrer umgekehrten Netzhautbilder aufrecht sehen. Die Netzhautbilder kommen bei der Lokalisation der Objekte eben gar nicht in Betracht; sie sind nur Mittel, die Lichtstrahlen je eines Punktes des Gesichtsfeldes auf je eine Nervenfaser zu konzentrieren. Wir hätten gerade ebensoviel Recht, uns darüber zu wundern, warum die Buchstaben eines gedruckten Buches nicht von rechts nach links verkehrt sind, da ja doch die metallenen Lettern, mit denen es gedruckt ist, verkehrt sind.

Es ist also richtiger zu sagen: „wir empfinden, an welchem Orte des Sehfeldes ein Objekt erscheint“, als zu sagen: „wir empfinden den Ort der Netzhaut, auf dem es abgebildet ist“. Dies letztere hat einen richtigen Sinn, insofern darunter nur gemeint ist, daß gewisse Eigentümlichkeiten der Empfindung, nämlich ihre Lokalzeichen, eigentümlich sind denjenigen Empfindungen, die durch einen bestimmten Ort der Netzhaut uns zugeleitet werden, und für die wissenschaftliche Untersuchung würden wir die lokalen Verhältnisse der Empfindung auch durch den Ort der Netzhaut, auf den das Licht fällt, charakterisieren

können. Der Ausdruck erregt aber immer das Mißverständnis, daß wir beim natürlichen Sehen irgend eine Art verborgener Kenntnis von der wirklichen Existenz und Lage der Netzhautstelle haben müßten, zu welcher Behauptung mir gar kein Grund vorzuliegen scheint.

Es ist schon früher hervorgehoben worden, daß diese Verbindung zwischen den lokalen Unterschieden der Empfindung und der Richtung im Sehfelde so ausschließlich ist, daß wir gar kein Mittel haben, die lokale Bestimmtheit unserer Empfindungen weder in unserem eigenen Bewußtsein, noch in der Mitteilung für andere anders zu bezeichnen, als indem wir die Stelle des Sehfeldes angeben, auf die sich die Empfindung bezieht.

Nachdem wir diese Definitionen festgestellt haben, können wir uns zu der Untersuchung wenden, wie weit unsere Fähigkeit reicht, Größenverhältnisse im Gesichtsfelde zu beurteilen, und welchen Täuschungen wir dabei ausgesetzt sind. Jede genauere Vergleichung zweier Raumgrößen, Linien, Winkel oder Flächen im Gesichtsfelde nimmt Augenbewegungen zu Hilfe. Wir wollen zunächst untersuchen, was wir mit Hilfe solcher Bewegungen erreichen können, und später, wie sich die Ausmessungen verändern, wenn wir die Augenbewegungen ausschließen. Ich wähle diese Ordnung, weil mir die Abmessungen mit Augenbewegungen, wie sie die genaueren sind, so auch die ursprünglicheren zu sein scheinen.

Über die Genauigkeit in der Vergleichung nahe gleicher Abstände im Gesichtsfelde sind von Fechner[1] und Volkmann Versuche angestellt worden. Ersterer hat einen Zirkel auf Distanzen von 10, 20, 30, 40 und 50 halbe Pariser Dezimallinien eingestellt, und die Spitzen eines zweiten Zirkels nach dem Augenmaß in dieselbe Distanz gebracht, wobei beide Zirkel, bis auf die Spitzen verdeckt in deutlicher Sehweite, 1 Pariser Fuß vom Auge entfernt, vor ihm nebeneinander auf dem Tische lagen. Nach jeder Einstellung wurde der Fehler derselben bestimmt. Volkmann hing nebeneinander drei durch Gewichte gespannte Fäden in vertikaler Richtung und horizontal gegeneinander verschiebbar auf, und machte nach dem Augenmaße ihre Abstände gleich, welche wechselten zwischen 10 und 240 mm, wobei sein Auge 800 mm von den Fäden entfernt war. Die Summe der bei den unter gleichen Umständen gemachten Versuchsreihen gemachten Fehler wurde genommen, wobei vom Sinne der Fehler abgesehen wurde, und diese Summe durch die Zahl der Beobachtungen dividiert; so erhielt er den mittleren Fehler, der bei diesen Versuchen stets nahehin den gleichen Bruchteil der ganzen verglichenen Länge ausmachte. Die Größe dieses mittleren Fehlers betrug im Mittel aus allen Beobachtungen in Bruchteilen der ganzen Länge der verglichenen Linien

bei Fechner . . . . $\frac{1}{62,1}$

bei Volkmann, frühere Versuche $\frac{1}{88,0}$

bei demselben, spätere Versuche $\frac{1}{101,1}$.

Es zeigte sich demnach für diese Beobachtungen das von Weber aufgestellte und von Fechner verallgemeinerte psychophysische Gesetz gültig,

[1] Fechner, Psychophysik. Bd. I. S. 211—236. Andere auch von Hegelmayer in Vierordts Archiv XI, 844—853.

welches wir schon bei der Untersuchung über die Abhängigkeit der Stärke der Lichtempfindung von der objektiven Helligkeit kennen gelernt haben, wonach die unterscheidbaren Unterschiede der Empfindungsgrößen der gesamten Größe des Empfundenen proportional sind.

Andere Versuche wurden mit viel kleineren mikrometrisch zu messenden Distanzen von Volkmann und einem seiner Schüler angestellt. Die Distanzen waren durch drei feine parallele Silberfäden, von 0,445 mm Dicke und 11 mm Länge bestimmt, welche durch Mikrometerschrauben verschoben werden konnten. Sie wurden ebenfalls so eingestellt, daß ihre Entfernung, wechselnd von 0,2 bis 1,4 mm, nach dem Augenmaß gleichgemacht wurde. Die Fehler nahmen in diesem Falle nicht mehr proportional den gemessenen Distanzen ab, sondern näherten sich einer unteren Grenze, wie zu erwarten war, da bei so kleinen Distanzen die Genauigkeit in der Unterscheidung kleinster Teile des Gesichtsfeldes, welche von der Feinheit der Netzhautelemente abhängt, mit in Betracht kommen muß. Der mittlere Fehler $\varDelta$ konnte aber dargestellt werden als die Summe eines konstanten und eines dem Abstande D der Fäden proportionalen Gliedes, nach der Formel

$$\varDelta = v + WD,$$

worin v und W zwei Konstanten bezeichnen. Es ergaben sich hierbei reduziert auf 340 mm Sehweite folgende Werte dieser Konstanten

	v in Millimetern	W
Volkmann horizontale Abstände	0,008210	$\frac{1}{79,1}$
Derselbe vertikale Abstände	0,007319	$\frac{1}{45,1}$
Appel horizontale Abstände	0,005331	$\frac{1}{164,5}$
Derselbe ebenso später	0,008548	$\frac{1}{85.3}$.

Die Werte von W in den beiden ersten Reihen zeigen, daß die Vergleichung vertikaler Abstände viel unvollkommener ist, als die Vergleichung horizontaler. Dasselbe beobachtet man übrigens auch sogleich, wenn man eine Reihe vertikaler und horizontaler Linien auf Papier zieht und sie nach dem Augenmaße zu halbieren sucht, und dann die abgeteilten Längen mit dem Maßstab vergleicht. Die Fehler in der Halbierung vertikaler Linien werden im allgemeinen viel größer, als die von horizontalen. Wenn man sich selbst beobachtet bei der Vergleichung zweier Abstände oder zweier gerader Linien, so findet man, daß kleine Unterschiede nur bemerkt werden, wenn man nacheinander den Fixationspunkt bald in die Mitte der einen, bald in die Mitte der andern Linie bringt so daß die beiden Linien nacheinander auf denselben Teilen der Netzhaut abgebildet werden. Bei festgehaltenem Fixationspunkte läßt man manches als gleich durchgehen, was sich sogleich als verschieden zu erkennen gibt, wenn man mit der Richtung des Blicks in der angegebenen Weise wechselt.*

Sehr viel schwieriger erweist sich die Vergleichung von horizontalen Längen mit vertikalen, und es zeigt sich dabei ein konstanter Fehler, indem wir nämlich geneigt sind, vertikale Linien für länger zu halten als gleich lange horizontale. Man sieht dies am besten, wenn man sich bemüht, nach dem

* Vgl. hierzu Anm. 1 am Schluß des Paragraphen. K.

Augenmaße ein Quadrat zu zeichnen auf einem Papiere, welches man senkrecht gegen die Gesichtslinie hält. Man macht die Höhe immer zu niedrig, und zwar, wie ich bei mir selbst finde, um $^1/_{30}$ bis $^1/_{60}$ der Grundlinie, im Mittel etwa um $^1/_{40}$; doch scheint dieses Verhältnis in verschiedenen Augen sehr zu variieren, WUNDT[1] gibt die Größe dieser Differenz an auf ein Fünfteil.

VOLKMANN[2] hat auch Versuche angestellt über die Fehlergrößen, welche bei Schätzung des Verhältnisses zweier nicht gleichen Distanzen begangen wurden. Der Beobachter stellte eine bewegliche Linie zwischen zwei andern ein auf $^1/_{10}$, $^2/_{10}$, $^3/_{10}$, $^4/_{10}$, $^5/_{10}$ der ganzen Entfernung. Dabei zeigten sich erstens Abweichungen zwischen dem Mittel aller Einstellungen für ein gewisses Größenverhältnis und der wirklich richtigen Einstellungen, welche VOLKMANN konstante Fehler nennt, und zweitens Abweichungen von dem Mittel der Einstellungen oder variable Fehler. Die konstanten Fehler machten die links liegende Distanz immer etwas zu groß im Verhältnis zur rechts liegenden. Als die zu teilende Größe einer Pariser Linie betrug der Wert der konstanten Fehler in Tausendteilen einer Linie im Mittel aus je 40 Versuchen:

Konstanter Fehler, aus je 40 Versuchen.

Ausgangspunkt von	Geforderte Verhältnisse								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Links	13,4	19,8	6,7	11,7	3,4	13,4	24,8	10,0	6,8
Rechts . . .	− 10,8	− 9,3	− 20,0	− 12,0	− 6,2	− 4,5	− 9,5	− 19,7	− 19,4
Unten	+ 2,9	+ 2,9	− 12,1	− 5,9	− 13,5	− 2,2	+ 7,2	+ 5,1	+ 11,6
Oben	− 5,0	− 4,7	− 6,0	+ 3,9	+ 9,7	+ 13,6	− 17,4	− 7,3	− 10,8

In den beiden oberen Reihen lag die zu teilende Distanz horizontal, in den beiden unteren vertikal. Als Ausgangspunkt ist das Ende derselben angegeben, von wo der abzumessende Teil angefangen wurde abzumessen.

Die variablen Fehler wurden nach ihrer absoluten Größe ohne Rücksicht auf das Vorzeichen addiert und dann durch die Anzahl der Beobachtungen dividiert. Es ergaben sich nahehin gleiche mittlere Größen derselben für komplementäre Verhältnisse. Ihre Größe war im Mittel von je 160 Beobachtungen (für 0,5 nur 80 Beobachtungen)

Mittelwerte der variablen Fehler.

Zu teilende Distanz	Gefordertes Verhältnis				
	0,1 und 0,9	0,2 und 0,8	0,3 und 0,7	0,4 und 0,6	0,5
Horizontal	6,73	4,36	3,01	2,64	1,11
Vertikal	7,09	9,01	9,95	8,61	7,98.

Absolut größer, aber relativ etwas kleiner wurden die Fehler in einer anderen Versuchsreihe, wo der ganze zu teilende Abstand 100 mm betrug, und die Grenzen der betreffenden Abstände durch drei feine von dem Maßstabe herabhängende Menschenhaare angezeigt waren. Die Größen sind in Zehntelmillimetern angegeben, so daß die Einheit wieder ein Tausendteil der zu teilenden Größe beträgt.

---

[1] Vorlesungen über Menschen- und Tierseele. S. 255.

[2] Berichte der Kön. Sächs. Ges. vom 7. August 1858.

Konstante Fehler.

Ausgangs-punkt von	Gefordertes Verhältnis								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Links	2,35	7,45	0,5	10,7	4,15	12,4	11,3	0,85	4,10
Rechts . . .	– 1,8	+ 0,6	– 11,1	– 5,2	– 4,0	– 7,5	5,5	– 4,4	– 2,8

Mittelwerte der variablen Fehler.

Für den Bruch 0,1 und 0,9 = 2,6
„ „ „ 0,2 „ 0,8 = 5,6
„ „ „ 0,3 „ 0,7 = 7,9
„ „ „ 0,4 „ 0,6 = 6,5
„ „ „ 0,5 „ = 2,8.

Wenn nun nicht bloß gleiche Entfernungen als gleich erkannt, sondern ungleiche Entfernungen ihrem Größenverhältnis nach erkannt werden sollen, so ist es nötig, diejenige Linie zwischen den Endpunkten der gegebenen Entfernung zu bestimmen, welche als Maß der Entfernung zu benutzen ist. In der Ebene ist dies die gerade Linie. Im Blickfelde, als einer gekrümmt erscheinenden Fläche, können gerade Linien nicht gezogen werden, und selbst um kürzeste Linien auf der Fläche zu ziehen, müßten wir eine genaue Anschauung von der Krümmung der Fläche des Blickfeldes mitbringen, die wir nicht bestimmt genug haben. Wenn man sich das Blickfeld als eine Kugelfläche vorstellt, deren Mittelpunkt der Drehpunkt des Auges ist, wie dies zum Zwecke wissenschaftlicher geometrischer Erörterungen gewöhnlich geschieht, so könnte man vermuten, daß objektiv gerade Linien der Außenwelt, die sich als größte Kreise in das kugelförmige Blickfeld projizieren, als kürzeste Linien, als Linien ohne Krümmung in dem Gesichtsfelde erscheinen müßten. Das ist aber nur unter gewissen Bedingungen der Fall.

Wenn wir eine gerade Linie betrachten, z. B. die Kante eines Lineals, und durch das Augenmaß zu ermitteln suchen, ob sie wirklich gerade oder gekrümmt sei, so zeigt sich das Urteil nach der schon im vorigen Paragraphen erwähnten Täuschung abhängig von der Richtung des Auges im Kopfe. Halten wir das Lineal horizontal und zu niedrig, so erscheint die Kante nach oben konkav; halten wir es zu hoch, so erscheint sie nach unten konkav. Daß dabei eine Augentäuschung stattfindet, erkennt man schnell, wenn man das Lineal so umwendet, daß die Kante statt nach oben nun nach unten sieht. Dann müßte eine wirklich nach unten konkave Kante jetzt nach oben konkav sein und umgekehrt. Aber wenn das Lineal richtig und gerade ist, bleibt die Augentäuschung bestehen. Hält man das Lineal aber so, daß die Mitte seiner Kante der Primärstellung entspricht, so erscheint diese gerade, wenn sie wirklich gerade ist. Nun wählt man allerdings durch einen natürlichen Trieb die Primärstellung, wenn man über eine solche Frage durch das Augenmaß entscheiden soll, doch ist die Sicherheit, mit der man diese Stellung einhält, nicht sehr groß. Dagegen finde ich, daß ich ziemlich geringe Krümmungen von Linealen in der Primärstellung erkennen kann, wenn ich das Lineal umwende, so daß ich bald die eine, bald die andere Fläche desselben gegen mich kehre. Auf diese Weise konnte ich bei einem Elfenbeinlineale von 200 mm Länge, welches konvex war und dessen Krümmung in der Mitte nur 0,35 mm von der geraden Linie nach außen bauchte, dessen Krümmungsradius demnach etwa 14 m betrug, die Krümmung

mit dem Auge richtig erkennen, ebenso bei einem anderen konkaven Lineale, welches in der Mitte ein halbes Millimeter abwich. So genaue Bestimmungen sind aber nicht bei fixiertem Blicke, sondern nur mit Hilfe der Augenbewegungen möglich.

Wir sind ferner imstande, mit großer Genauigkeit zu entscheiden, ob gerade Linien einander parallel sind oder nicht. Um das zu ermitteln, lassen wir den Blick an einer von ihnen, oder in der Mitte zwischen ihnen hin und hergehen, und erkennen dann mit ziemlich großer Genauigkeit, ob ihr Abstand nach dem einen Ende hin ebenso groß, oder ob er größer ist als am andern Ende. So sind wir ferner auch mit verhältnismäßig großer Sicherheit imstande zu erkennen, daß zwei Winkel, deren Schenkel einander parallel gerichtet sind, einander gleich groß sind, weil wir eine kleine Abweichung vom Parallelismus der Schenkel leicht erkennen und daraus dann auf Ungleichheit der Winkel schließen. Nach Versuchen von E. Mach[1] geschieht die Beurteilung des Parallelismus genauer für horizontale und vertikale Linien als für geneigte. Dagegen ist die Vergleichung solcher Winkel, deren Schenkel nicht parallel miteinander sind, nicht nur sehr unsicher, sondern auch ziemlich regelmäßigen konstanten Fehlern unterworfen.

Verhältnismäßig die einfachste Aufgabe dieser Art ist, zu entscheiden, ob ein Winkel seinem Nebenwinkel gleich und also ein Rechter sei. Wenn von zwei sich rechtwinklig kreuzenden geraden Linien die eine horizontal, die andere vertikal ist, so erscheinen für das rechte Auge der meisten Individuen die nach rechts oben und links unten liegenden rechten Winkel wie stumpfe, die beiden andern wie spitze Winkel. Für das linke Auge umgekehrt erscheinen die dem rechten Auge stumpf erscheinenden Winkel spitz, die spitzen stumpf. Dabei ist zu beachten, daß man beide Augen nacheinander senkrecht gegen die Fläche der Zeichnung auf den Kreuzungspunkt der Linien einstellen muß. Versucht man dagegen nach dem Augenmaße zu einer gegebenen Horizontallinie eine Vertikale zu ziehen, so weicht deren oberes Ende um etwa einen Grad nach rechts herüber, wenn man mit dem rechten Auge sehend die Zeichnung gemacht hat, und nach links, wenn es mit dem linken Auge geschah. So stellt Fig. 21 ein für mein rechtes Auge scheinbar richtiges rechtwinkliges Kreuz der Linien ab und cd vor, während die Linienstücke γ und δ die Lage der wirklich richtigen Vertikalen bezeichnen. Sehe ich mit dem linken Auge dieselbe Zeichnung an, so erscheint mir das obere Ende von cd im Gegenteil übertrieben nach rechts geneigt.

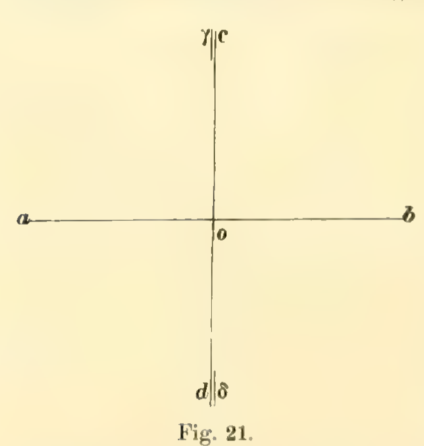


Fig. 21.

Die Größe des Irrtums, den man betreffs der rechten Winkel begeht, hängt von der Neigung ihrer Schenkel gegen den Netzhauthorizont ab. Ich sehe rechte Winkel richtig mit dem rechten Auge, wenn das obere Ende des einen Schenkels um etwa 18° von der Vertikale nach links abweicht, mit dem linken Auge, wenn es um etwa ebensoviel nach rechts abweicht. Dagegen erscheint der Unterschied am größten, wenn die Schenkel um 45° von der zuletzt genannten Lage aus gedreht werden, wobei die nach rechts und links

[1] Sitzungsber. d. K. K. Akad. zu Wien. 1861. Bd. XLIII, 215—224.

geöffneten Winkel etwa wie Winkel von 92°, die nach oben und unten gekehrten wie 88° erscheinen.

Wenn der eine Schenkel horizontal liegt, erscheinen als rechte Winkel für meine Augen solche von 91,2° und 88,8°; bei VOLKMANN[1] beträgt der für das linke Auge 91,1°, für das rechte 90,6°; doch hat letzterer Beobachter bei diesen Versuchen nicht ein Kreuz beobachtet, sondern eine einzelne Linie bald horizontal, bald vertikal zu stellen gestrebt; die einzelnen Beobachtungen sind dabei je 60 mal wiederholt worden.

Ebenso finde ich, daß man auffallend große Fehler macht, wenn man einen Winkel von 30 bis 45° zeichnet, dessen einer Schenkel horizontal liegt, und sich dann bemüht nach dem Augenmaße eine dritte, der Vertikalen nähere Linie durch den Scheitel des genannten Winkels zu ziehen so, daß ein zweiter Winkel entsteht, der jenem ersten gleich sei. Man macht diesen zweiten regelmäßig beträchtlich zu groß. Wenn der erste Winkel 30° betrug, machte ich den zweiten größer als 34°, gleichviel ob ich mit dem rechten oder linken Auge hinsah, und ob der Winkel sich nach rechts oder links öffnete. Drehte ich die Figur aber so, daß der zuletzt gezeichnete Schenkel nun horizontal lag, so erschien der Größenunterschied übertrieben.

Dahin gehört auch die Tatsache, daß in einem richtig gezeichneten gleichseitigen Dreieck, dessen eine Seite horizontal liegt, der Winkel an der Spitze immer kleiner erscheint, als die Winkel an der Basis*.

Fragen wir nun, wie ist es überhaupt möglich, daß Raumgrößen, die verschiedenen Teilen des Sehfeldes angehören, miteinander verglichen werden können, so lehren uns die oben erwähnten Selbstbeobachtungen schon eine Methode der Vergleichung, so oft besagte Raumgrößen so liegen, daß sie nach einander auf demselben Teile der Netzhaut, und zwar am besten auf ihrer Mitte, so abgebildet werden können, daß ihre entsprechenden Punkte nach einander auf dieselben Punkte der Netzhaut fallen. In der Tat ist dies das Verfahren, welches wir anwenden, um nach dem Augenmaße z. B. die Länge zweier geraden Linien A und B, die einander parallel sind, zu vergleichen. Wir richten den Blick erst auf die Mitte von A, dann auf die Mitte von B, dann wieder von A und so fort, und suchen zu ermitteln, ob wir in beiden Fällen ganz denselben Eindruck erhalten, d. h. ob dieselben Netzhautpunkte in derselben Erstreckung von den Bildern beider Linien getroffen werden. Dabei brauchen wir offenbar von der Form und Länge des Bildes auf der Netzhaut nichts zu wissen. Die Netzhaut ist wie ein Zirkel, dessen Spitzen wir nacheinander an die Enden verschiedener Linien ansetzen, um zu sehen, ob sie gleich lang sind, oder nicht, wobei wir über die Entfernung der Zirkelspitzen und die Form des Zirkels nichts weiter zu wissen brauchen, als daß sie unverändert geblieben sind.

Ein Unterschied aber ist zwischen der Vergleichung mittels der Netzhaut und der mittels des Zirkels. Die Verbindungslinie der Zirkelspitzen können wir nach jeder Richtung hinwenden, das können wir aber dem Gesetze der Augenbewegungen zufolge nicht tun mit der Verbindungslinie je zweier Netzhautpunkte,

---

[1] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1864. Heft 2. S. 224 bis 225.

* Vgl. hierzu Anm. 7 am Schluß des Paragraphen. K.

wenn wir nicht ausgiebige Bewegungen mit dem Kopfe machen wollen, welche wegen der damit verbundenen größeren Anstrengung lange nicht so häufig und so schnell wechselnd gemacht werden können, und wenn sie gemacht werden, meist eine wesentliche Veränderung des Gesichtspunkts, des Ortes unseres Auges im Raume und somit der ganzen perspektivischen Ansicht zufolge haben. Wenn $a\,b$ und $\alpha\,\beta$ zwei Paare von Punkten im Gesichtsfelde sind, deren Entfernung verglichen werden soll, und ich etwa zuerst a fixiert habe, so daß sich a auf dem Zentrum der Netzhautgrube A, und der Punkt b auf dem Netzhautpunkte B abgebildet hat, wenn ich dann das Auge wende und α fixiere, so daß α auf dem Zentrum der Netzhaut A abgebildet ist, so wird der Netzhautpunkt B bei der neuen Stellung der Gesichtslinie eine ganz bestimmte Lage haben, die ich ohne Bewegung des ganzen Kopfes nicht willkürlich ändern kann, und die Richtung der Linie $\alpha\beta$ im Gesichtsfelde muß eine ganz bestimmte sein, damit sich β auf B abbilden kann.

Wenn a, b, α und β nahe genug dem Hauptblickpunkte liegen, daß wir das sie umschließende Stück des Gesichtsfeldes als Ebene betrachten können, so können die Linien $a\,b$ und $\alpha\beta$ nacheinander auf denselben Netzhautpunkten nur dann abgebildet werden, wenn sie einander parallel sind. Eben deshalb können nun die Längen zweier paralleler Linien gut und sicher miteinander verglichen werden, während wir bei der Vergleichung nicht paralleler Linien, selbst wenn sie einander nahe liegen, großen Irrtümern ausgesetzt sind.

In derselben Weise kann, wie schon oben angeführt ist, der Parallelismus zweier Linien durch die Gleichheit ihrer Abstände an allen Stellen, und die Gleichheit von Winkeln mit parallelen Schenkeln gut beurteilt werden.

Wenn nun eine Linie im Gesichtsfelde als gerade anerkannt werden soll, und sie geht durch den Hauptblickpunkt, so können wir, indem wir das Auge an ihr hingleiten lassen, ebenfalls ihre einzelnen Teile alle nacheinander auf derselben Linie der Netzhaut abbilden. Wir haben im vorigen Paragraphen gesehen, daß wenn wir von einem geraden Linienstück, welches den Hauptblickpunkt schneidet, ein Nachbild entwickeln und den Blick in Richtung des Meridians wandern lassen, in welchem jenes Linienstück liegt, das Nachbild immer mit jenem Meridiane zusammenfällt. Das Nachbild bezeichnet bei jenen Versuchen die Projektionen jener Netzhautstellen in das Gesichtsfeld, welche den Eindruck des linienförmigen Objektes empfangen haben, und es folgt aus diesem Versuche, daß alle Teile eines solchen Meridians nacheinander auf denselben Netzhautpunkten abgebildet werden können.

Indem also das Auge einem solchen Meridiane des Sehfeldes folgt, verschiebt sich die entsprechende Linie des Netzhautbildes auf der entsprechenden Linie der Netzhaut selbst, indem beide fortdauernd kongruent zusammenfallen, und vor dem Auge verschiebt sich das Sehfeld gegen das Blickfeld so, daß der betreffende Meridian des Sehfeldes sich in dem des Blickfeldes und stets mit ihm zusammenfallend verschiebt.

Dergleichen Linien im Blickfelde, deren Bild sich in sich selbst verschiebt, sind nun auch die im vorigen Paragraphen (S. 67) erwähnten Direktionskreise oder Richtkreise, welche alle durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes hindurchgehen. Dort ist nachgewiesen worden, daß, wenn ein linienförmiges Nachbild bei Fixierung eines Punktes eines solchen Richtkreises mit seiner Richtung kongruiert, es auch in allen anderen Punkten mit ihm kongruiert. Da das Nachbild auf der Netzhaut festliegt, so wird dadurch auch konstatiert,

daß die Linienelemente eines solchen Richtkreises sich, wenn wir ihn mit dem Blicke durchlaufen, fortdauernd auf derselben Netzhautlinie abbilden.

Daß ein linienförmiges Nachbild von geringer Länge mit denjenigen andern Direktionskreisen kongruiert, welche im Occipitalpunkte dieselbe Tangente haben, ist ebenfalls an der zitierten Stelle schon bemerkt worden.

Durch die erwähnten Eigentümlichkeiten bekommen nun die Richtkreise für das Auge eine ganz besondere Bedeutung. Die gerade Linie in der Ebene zeichnet sich dadurch vor allen anderen aus, daß jedes Stück derselben jedem anderen Stücke kongruent ist, wie man die beiden auch zusammenlegen mag. Die Eigenschaft der Kongruenz jedes Teils mit jedem und die damit zusammenhängende Verschiebbarkeit der Linie in sich selbst teilt mit der geraden Linie nur noch der Kreis. Aber zwei Kreisbögen von gleicher Länge und Krümmung müssen schon in einer bestimmten Weise zusammengelegt werden, um zu kongruieren. Man kann ihre Enden auch so aufeinander legen, daß die Linienstücke selbst nicht kongruieren. Auf dieser Eigenschaft der geraden Linie beruht auch wesentlich ihre Bedeutung als Längenmaß. Denn dafür können wir nur eine Linie gebrauchen, die eindeutig bestimmt ist, wenn ihre Endpunkte bestimmt sind, und deren jeder Teil kongruierend auf jeden andern gelegt werden kann.

Im Blickfelde gibt es nun nur eine Art von Linien, an denen wir durch einen unmittelbaren Akt der Empfindung konstatieren können, daß sie in sich selbst verschiebbar und sich selbst also in allen ihren Teilen kongruent seien; das sind, wie die vorausgehende Erörterung zeigt, unter Voraussetzung des Listingschen Gesetzes, die R i c h t k r e i s e. Zwar können auch andere Kreise im Blickfelde erscheinen, die wir für in sich selbst verschiebbar erklären müssen, aber wir können dies nur durch Messungen und Schlüsse, nicht durch einen unmittelbaren Akt der Empfindung konstatieren.

Wenn ein Auge in seinen Bewegungen abweicht vom Listingschen Gesetze, so existieren bei einem solchen nicht notwendig Linien, die bei Bewegungen des Blicks in ganzer Länge in sich selbst verschiebbar sind; aber man wird jedesmal Linien konstruieren können, deren Elemente alle nacheinander auf demselben das Zentrum der Netzhaut schneidenden Linienelemente der Netzhaut abgebildet werden können. Solche wollen wir R i c h t l i n i e n des Blickfeldes nennen. Nur unter Voraussetzung des Listingschen Gesetzes für die Augenbewegungen sind alle Richtlinien des Blickfeldes in sich selbst verschieblich und erscheinen dem Auge, dessen Blick an ihnen entlang läuft, fortdauernd in unverändertem Netzhautbilde. Es ist dies eine wesentliche Eigentümlichkeit der dem Listingschen Gesetze folgenden Augenbewegungen.

Gerade Linien des objektiven Raumes erscheinen im kugelförmigen Gesichtsfelde als größte Kreise desselben. Größte Kreise fallen mit den Richtkreisen nur zusammen, wenn sie durch den Hauptblickpunkt (die Primärstellung der Blicklinie) gehen. Dann erscheinen kurze Stücke von ihnen, wie die oben beschriebenen Versuche zeigen, als gerade Linien, sonst aber gekrümmt, und zwar entgegengesetzt der wirklichen Krümmung der Richtkreise gekrümmt.

Die Richtkreise, bezichlich Richtlinien, müssen in der Tat in dem flächenhaften Blickfelde die Stelle der geraden Linien, welches die Linien konstanter Richtung in der Ebene sind, vertreten. Wir können mit einem kurzen Lineal in der Ebene eine beliebig lange gerade Linie ziehen, indem wir zuerst eine solche ziehen, so lang als das Lineal es erlaubt, dann das Lineal längs der gezogenen Linie eine Strecke weit verschieben und so fortfahren. Ist das Lineal

genau gerade, so erhalten wir bei diesem Verfahren eine gerade Linie; ist es selbst etwas gekrümmt, so erhalten wir einen Kreis. Statt des verschiebbaren Lineals dient uns im Gesichtsfelde die mit einem linienhaften Gesichtseindruck, der unter Umständen bis zum Nachbilde gesteigert sein kann, versehene zentrale Stelle des deutlichsten Sehens. Wir verschieben den Blick in Richtung dieser Linie, dabei verschiebt sich die Linie selbst und zeigt uns die Fortsetzung dieser Richtung an. In der Ebene können wir jenes Verfahren gleich gut mit jedem geradlinigen oder bogigen Lineal ausführen, im Gesichtsfelde aber ist für jede Richtung des Blicks und der Bewegung nur eine einzige Art von Linie möglich, die sich fortdauernd in ihrer eigenen Richtung verschieben läßt.

Wir sehen also, wie durch die Augenbewegungen und ihr bestimmtes Gesetz gewisse Abmessungen im Blickfelde möglich werden. Nun finden wir aber, wie oben schon bemerkt worden ist, daß auch bei vollkommen ruhendem Auge im indirekten Sehen eine gewisse Beurteilung der Abmessungen des Sehfeldes möglich ist, die natürlich sehr viel unbestimmter ist, als die, welche mittels des bewegten Blicks gewonnen wird, schon weil das indirekte Sehen überhaupt keine große Genauigkeit gewährt. Daß aber die Fähigkeit zu solcher Abmessung da sei, zeigt sich am schlagendsten an subjektiven Erscheinungen, die überhaupt nur im indirekten Sehen beobachtet werden können, wie an der Aderfigur. Wir sind imstande, eine solche Figur nachzuzeichnen, ihre Verziehungen bei wechselnder Beleuchtungsrichtung wahrzunehmen, und haben überhaupt eine bestimmte flächenhafte Anschauung derselben, trotzdem wir nicht imstande sind, durch Bewegungen des Auges die Lage derselben auf der Netzhaut zu verändern und die einzelnen Teile derselben mit dem Blicke zu durchlaufen. Ebenso zeigt sich bei momentaner Beleuchtung des Gesichtsfeldes durch einen Blitz, dessen Dauer zu kurz ist, als daß eine merkliche Bewegung des Auges während der Dauer der Beleuchtung ausgeführt werden könnte, daß wir imstande sind, die Gestalt der vor uns liegenden Objekte der Hauptsache nach richtig zu beurteilen.

Es kommen aber auch bei dieser Art der Betrachtung eigentümliche Täuschungen des Augenmaßes vor, welche insofern wichtig sind, als sie uns Andeutungen über die Art, wie wir zur Ausmessung des Feldes des indirekten Sehens gekommen sind, zu geben scheinen.

Erstens gehören hierher die schon vorher beschriebenen Täuschungen in der Vergleichung von Winkeln mit nicht parallelen Schenkeln und von Linien nicht übereinstimmender Richtung, weil, wie die Selbstbeobachtung lehrt, Bewegung des Auges in diesen Fällen nichts beiträgt und auch nichts beitragen kann zur Verbesserung des Urteils. Die genannten Täuschungen treten ebenso gut ein bei strenger Fixation eines Punktes als bei wanderndem Blick.

Dazu kommt nun noch ein anderes System von Täuschungen, die ich bisher noch nirgends erwähnt gefunden habe, und welche sich beziehen auf die als ungekrümmt erscheinenden Linien des Sehfeldes und auf die scheinbare Größe seiner peripherischen Teile. In der Ebene sind die geraden Linien gleichzeitig die kürzesten und die, welche weder nach der einen, noch nach der anderen Seite hin eine Krümmung zeigen. Auf der Kugel sind es die größten Kreise, deren Krümmungsradius ist senkrecht zur Kugelfläche gerichtet, in der Kugelfläche selbst zeigen sie keine Krümmung. Alle Kreise dagegen, welche kleiner sind als ein größter, erscheinen konkav auf der Seite, wo das kleinere von ihnen abgegrenzte Kugelstück liegt, konvex auf der entgegengesetzten Seite.

Wir können nun fragen, welches sind die ungekrümmten Linien im Sehfelde? Sind es, wie man zunächst vielleicht vermuten sollte, die größten Kreise des kugelig gedachten Feldes? Davon, daß diese es nicht in allen Fällen sind, kann man sich leicht überzeugen.

Man wiederhole den früher erwähnten Versuch mit drei Sternen mit fixiertem Blicke, während früher Bewegung des Blicks über dieselben hin vorausgesetzt war. Man suche sich am Sternenhimmel drei helle Sterne, die möglichst annähernd in einem größten Kreise liegen, was man mittels eines ausgespannten Fadens, an dem man vorbei nach den drei Sternen hinvisiert, hinreichend genau erkennen kann. Man wähle diese Sterne möglichst weit voneinander entfernt; doch müssen sie hell genug sein, um auch im indirekten Sehen noch leicht erkannt und von den benachbarten kleineren unterschieden zu werden. Wenn man solche gefunden hat, fixiere man den mittleren; sie werden in einer geraden Linie zu liegen scheinen, oder wenn sie nicht ganz genau in einem größten Kreise liegen, so erkennt man richtig den Sinn und ungefähr auch die Größe der Abweichung. Nun wähle man aber den Fixationspunkt in einiger Entfernung auf der einen oder anderen Seite der Sternenreihe, man wird sogleich und sehr deutlich die Reihe gegen den Fixationspunkt konkav sehen, um desto mehr konkav, je weiter entfernt der Fixationspunkt von der Reihe der drei Sterne ist. Daraus lernen wir, daß am Sternenhimmel bei unbewegter Blickrichtung ein größter Kreis nur dann ungekrümmt erscheint, wenn er durch den Fixationspunkt geht, dagegen konkav gegen den Fixationspunkt, wenn er das nicht tut. Es folgt daraus weiter, daß Linien, welche auf den peripherischen Teilen des Gesichtsfeldes ungekrümmt erscheinen sollen, in Wahrheit auf dem Himmelsgewölbe konvex gegen den Fixationspunkt sein müssen.

An irdischen Objekten wird man in der Beurteilung der Ausmessungen des Sehfeldes zwar leicht beeinflußt durch die schon vorher erworbene Kenntnis der wirklichen Ausmessungen des Objekts, es gelingt aber doch auch an solchen dieselbe Täuschung wahrzunehmen.

Am zweckmäßigsten ist es, sich weit über eine große Tischplatte zu beugen, so daß man keine erkennbaren geraden Linien mehr im Gesichtsfelde hat, nach denen man sich richten könnte, und einen Punkt der Platte zu fixieren. Wenn man dann in einiger Entfernung vom Fixationspunkte drei Papierschnitzelchen oder andere helle Objekte hinlegt und dieselben in eine gerade Linie zu richten strebt, so findet man stets, sobald man den Blick auf die Papierchen selbst richtet, daß man sie in einen gegen den früheren Fixationspunkt konvexen Bogen gelegt hat.

Wenn man über dieselbe Tischplatte einen langen von zwei parallelen Linien begrenzten und etwa drei Zoll breiten Papierstreifen legt und dessen Mitte fixiert, so bemerkt man, daß seine Enden im indirekten Sehen schmaler als die Mitte erscheinen, und daß er von zwei mit ihrer Konkavität gegeneinander sehenden Bögen begrenzt erscheint.

An geraden Linien von geringerer scheinbarer Erstreckung bemerkt man die Krümmung meistenteils nicht, weil wir vielmehr geneigt sind, sie als gerade Linien der körperlichen Objekte, denn als größte Kreise des Gesichtsfeldes zu betrachten und zu deuten.

Während nun größte Kreise konkav gegen den Fixationspunkt erscheinen, wenn sie nicht durch diesen selbst hindurchgehen, so erscheinen im Gegenteil

Kreise, welche Parallelkreise zu einem durch den Fixationspunkt gehenden größten Kreise sind, konvex gegen den genannten Punkt. Man biege, um dies zu prüfen, einen drei bis fünf Zoll breiten Papierstreifen zu einem Halbzylinder und bringe das Auge in dessen Achse. Fixiert man nun die Mitte des Papierstreifens, so scheint derselbe nach beiden Enden hin breiter zu werden und von zwei mit der Konvexität gegeneinander gekehrten Bögen begrenzt. Die seitlichen Teile des Streifens befinden sich in derselben Entfernung vom Auge, wie die Mitte desselben, und erscheinen deshalb, geometrisch betrachtet, unter demselben Gesichtswinkel, wie die Mitte, während sie scheinbar im Sehfelde sich größer darstellen als die Mitte des Streifens.

Denken wir uns den Fixationspunkt am Horizont gelegen, über ihm befinde sich in der Höhe h ein Punkt, durch den im indirekten Sehen eine scheinbar ungekrümmte horizontal verlaufende Linie gezogen werden soll. Der größte Kreis, welcher rechts und links in gleicher Entfernung den Horizont schneidet und in der Entfernung h unter dem Occipitalpunkt des Beobachters hindurchgeht, erscheint nach unten konkav. Ein wirklich überall horizontal verlaufender Parallelkreis des Horizontes, der in der Entfernung h auch über dem Occipitalpunkte hinweggeht, entspricht ebenfalls nicht der Aufgabe, er erscheint konvex nach unten. Da der erste dieser Kreise nach unten konkav, der zweite konvex erscheint, so muß die scheinbar ungekrümmte Linie zwischen diesen beiden liegen, und wenn sie ein Kreis ist, so muß sie weniger als h vom Occipitalpunkt entfernt über oder unter diesem hindurchgehen. Da können wir nun an die Richtkreise des Blickfeldes denken, die durch den Occipitalpunkt selbst hingehen. Versuchen wir es mit diesen.

Zu dem Ende habe ich die Richtkreise des Blickfeldes, welche mit der durch den Fixationspunkt gehenden vertikalen und horizontalen Linie übereinstimmende Richtung haben, auf eine ebene Tafel projiziert; sie erscheinen dabei als Hyperbeln. Um sie im ganzen Sehfelde, auch in den indirekt gesehenen Teilen desselben möglichst deutlich erscheinen zu lassen, habe ich die Felder des von den Kurven gebildeten Gitters schachbrettartig schwarz und weiß gemalt, wie Fig. 22 in verkleinertem Maßstabe $^3/_{16}$ zeigt; A bezeichnet die in gleichem Verhältnis verkleinerte Entfernung, in der das Auge des Beobachters von der Tafel, der Mitte derselben gerade gegenüberstehend, entfernt sein muß. Der Mittelpunkt der Tafel wird fixiert. Das Original der Fig. 22 hatte ich an der Wand des Zimmers, seine Mitte in der Höhe meiner Augen über dem Boden befestigt; ein rechtwinkliges Winkelmaß, dessen Katheten die Länge der für das Auge verlangten Entfernung von 20 cm hatten, diente zur Kontrolle dieses Abstandes, indem man eine seiner Katheten an die Tafel anlegte und die Spitze des gegenüberliegenden Winkels den äußern Augenwinkel berühren ließ.

In der Tat erscheinen nun die als Hyperbeln[1] projizierten Richtkreise des Blickfeldes unter diesen Umständen im Gesichtsfelde als gerade Linien, oder wenigstens als Linien, die nicht in der Fläche des Sehfeldes gekrümmt sind. Die einzelnen Vertikalreihen und Horizontalreihen schwarzweißer Felder sehen überall gerade und überall gleichbreit aus, so lange man unverwandt den Mittel-

[1] Die Gleichung dieser Hyperbeln ist im vorigen Paragraphen unter 3c) und den folgenden Nummern gegeben; die Abstände derselben in der mittleren Horizontale und Vertikale sind so gewählt, daß sie gleichen Gesichtswinkeln entsprechen.

punkt der Zeichnung fixiert. Natürlich erkennt man aber die Krümmung der seitlich gelegenen Felderreihen, sobald man den Blick nach ihnen hinwendet. Hierbei tritt eine eigentümliche Täuschung ein. Ich sehe nämlich, sowie ich den Blick wandern lasse, die Zeichnung gewölbt, wie eine flache Schüssel, so daß die Krümmung der Hyperbeln wie eine Krümmung nach der Fläche erscheint und in dieser gekrümmten Fläche die Linien als größte Kreise (oder kürzeste Linien) erscheinen. Es wird durch diese Anschauung der Widerspruch zwischen direktem und indirektem Sehen einigermaßen aufgehoben. Nach den im Gesichtsfelde selbst gelegenen Richtungen erscheinen die Hyperbeln nicht gekrümmt, nur das Gesichtsfeld selbst erscheint gekrümmt.

Man muß also wohl darauf achten, daß man bei dieser Beobachtung den Blick fest auf den Mittelpunkt der Tafel gerichtet hält. Sollte man sich von der Vorstellung ihrer wirklichen Gestalt nicht so schnell frei machen können, so erleichtert es die Täuschung, wenn man dicht vor das Auge eine Linse hält, in deren Brennpunkt die Tafel liegt. Freilich erscheinen die peripherischen Teile der Tafel dadurch etwas verzerrt; die Brechung in der Linse vergrößert bei sehr schiefem Einfall der Strahlen die Krümmung der Hyperbeln; aber der größere mittlere Teil der Tafel wird durch die Linse, wie in unendlicher Entfernung liegend gesehen und dadurch die Abstraktion von seiner wahren körperlichen Gestalt begünstigt.

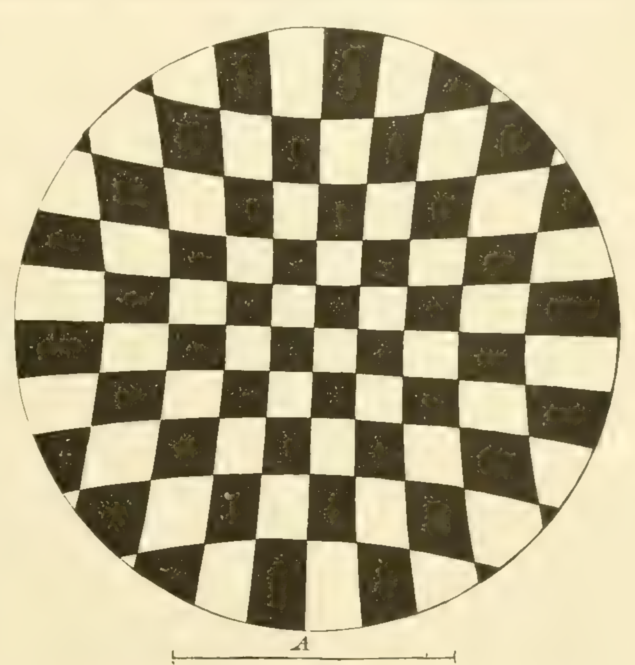


Fig. 22.

Am vollkommensten gelingt die Täuschung, wenn man den Mittelpunkt der Tafel so lange fixiert, bis ein kräftiges Nachbild entwickelt ist und man dies mit geschlossenen Augenlidern gegen das helle Fenster gewendet betrachtet.

Ich verfuhr weiter so, daß ich anfangs mein Auge weiter als 20 cm von der Tafel entfernte, wobei die rechts und links, oben und unten gelegenen Hyperbeln gekrümmt erschienen, und mich dann allmählich näherte, bis sie mir gerade geworden waren, dann maß ich den Abstand meines Auges von der Tafel mittels des erwähnten Winkelmaßes. Ging ich noch näher heran, so fingen die Hyperbeln an, sich scheinbar nach der entgegengesetzten Seite zu krümmen, als nach der sie wirklich gekrümmt waren. Dabei fand ich fast stets für die Entfernung meines Auges von der Tafel 20 cm, wenn ich auf die Horizontallinien der Tafel achtete und diese gerade zu sehen trachtete, und auch für die mittleren Vertikalstreifen stimmte es gut. Für die äußeren, besonders die nach der Schläfenseite liegenden Vertikalstreifen dagegen war ich

geneigt, eine der Tafel etwas nähere Stellung zu wählen. Deren wirkliche Krümmung schien in der Entfernung von 20 cm, für die die Tafel berechnet war, noch nicht ganz aufgehoben zu sein.

Auch bei schief gehaltenem Kopfe, wobei die Linien der Tafel auf schräg liegende Meridiane der Netzhaut fielen, blieben die Erscheinungen dieselben.

Daraus geht also hervor, daß so weit die Unbestimmtheit des indirekten Sehens und des entsprechenden Augenmaßes zu beurteilen erlaubt, die Richtlinien des Blickfeldes, wie sie im Sehfelde bei fixiertem Hauptblickpunkte erscheinen würden, die scheinbar ungekrümmten, also auch scheinbar kürzesten Linien des Sehfeldes sind.

Diese besondere Gestalt der kürzesten Linien im Sehfelde hat nun noch weitere Folgen für dessen scheinbare Gestalt und die scheinbare Größe der Objekte, wie schon vorher bemerkt wurde. Man denke sich den horizontalen Meridian des Sehfeldes gezogen und 10° über dessen Mitte in horizontaler Richtung eine Richtlinie. Diese trifft mit jenem Meridian in 180° Entfernung hinter dem Kopfe des Beobachters zusammen und tangiert ihn dort; in 90° Entfernung aber an den Rändern des Gesichtsfeldes ist die Richtlinie nur noch um 5° senkrecht entfernt von dem genannten Meridiane, und da die beiden Kreise im Sehfelde als parallele Linien erscheinen, so erscheint der senkrechte Abstand beider von 5° am Rande ebenso groß wie der von 10° in der Mitte, und in gleicher Weise erscheinen auch an anderen Stellen des Randes des Sehfeldes die diesem Rande parallelen Dimensionen der Bilder relativ zu groß.

Dies zeigt sich nun auch in folgenden Versuchen. Man stelle sich so, daß man zur Seite um etwa 90° vom Fixationspunkt entfernt eine weiße Tür in einer dunklen Wand, oder einen dunklen Baum vor der hellen Himmelsfläche hat, und beachte, wie hoch diese im indirekten Sehen erscheinen. Man wende dann Auge und Kopf direkt nach diesen Gegenständen hin, so wird man finden, daß sie viel niedriger erscheinen, und daß im Gegensatz zu der verminderten Höhe ihre Breite viel mehr heraustritt. Berge am Rande des Gesichtsfelds erscheinen in ähnlicher Weise höher und steiler, als wenn man direkt hinblickt.

Andererseits lege man einen weißen Bogen Papier vor sich auf einen dunklen Fußboden und sehe horizontal gerade aus, so daß das Papier am untern Rande des Gesichtsfeldes erscheint, es wird relativ zu breit von rechts nach links erscheinen und sich scheinbar zusammenziehen, sobald man direkt hinblickt.

Während so die der Peripherie des Sehfeldes parallelen Bögen vergrößert erscheinen, erscheinen die peripherischen Teile der radial verlaufenden Linien etwas verkleinert. Die Hyperbeln der Fig. 22 sind so konstruiert, daß aus der Entfernung *A* gesehen die Scheitel der horizontal und die der vertikal verlaufenden Hyperbeln um gleiche Gesichtswinkel von je 10° voneinander abstehen. Wenn also die Hyperbeln als gerade Linien erscheinen, so sollten die schwarzen und weißen Felder alle als gleich große Quadrate erscheinen. Das ist aber nicht der Fall; vielmehr erscheinen die von der horizontalen Mittellinie weit nach oben und nach unten gelegenen Quadrate zu niedrig gegen ihre Breiten. Weniger deutlich finde ich es, daß die nach rechts und links gelegenen vielleicht etwas zu schmal in ihrer Breite erscheinen. Doch ist überhaupt diese Vergleichung der Größen direkt und indirekt gesehener Objekte sehr unvollkommen.

Eine farbige kreisförmige Pappscheibe vor einen kontrastierenden Grund gehalten, erscheint daher am oberen und unteren Rande des Sehfeldes als eine elliptische Scheibe mit längerem horizontalen Durchmesser. Weniger deutlich zeigt sie sich am rechten und linken Rande des Sehfeldes als eine Ellipse mit längerem vertikalen Durchmesser.

Da die Seitenteile des Sehfeldes uns etwas zu hoch und etwas zu schmal erscheinen, so besteht eine gewisse Neigung, sie für näher und schräg gestellt gegen die Gesichtslinie zu halten. Sowie man den Blick nach ihnen hinwendet, scheinen sie zurückzuweichen und sich mehr senkrecht gegen die Blicklinie zu stellen. Es ist dies eine Täuschung, die ich bei weit entfernten Objekten am Horizont, am Sternenhimmel sehr gewöhnlich sehe. Das Sehfeld erscheint mir dann nicht als eine Kugel, in deren Mittelpunkt sich das Auge befindet, sondern es erscheint stärker konkav als eine solche; doch möchte ich nicht sagen, daß das monokulare Sehfeld bei unbewegtem Blicke sich uns mit einiger Entschiedenheit als eine bestimmt geformte Fläche darstellte.

In der Tat lassen sich nun die hauptsächlichsten der eben beschriebenen Eigentümlichkeiten der Wahrnehmung in folgendem geometrischen Bilde zusammenfassen. Man denke sich zuerst das Blickfeld als eine Hohlkugel, in deren Mittelpunkt das Auge sich befindet. Man denke Radien vom Mittelpunkte (Richtungslinien des Sehens) gezogen nach den einzelnen Objektpunkten und verlängert bis zur Kugeloberfläche. Wo diese Radien die Kugeloberfläche schneiden, ist das auf die Kugelschale projizierte Bild des Objektes. Man denke sich die Objekte entfernt und nur durch ihre Bilder auf der Kugelfläche des Blickfeldes ersetzt. Das Auge fixiere den Hauptblickpunkt; ihm gegenüber liegt der Occipitalpunkt. Ich sage: das Auge sieht die Objekte im Sehfelde scheinbar so verteilt, wie es sie nach geometrisch richtiger Projektion sehen würde, wenn es die Bilder auf der Kugelfläche vom Occipitalpunkte derselben aus ansähe. Oder auch: Das Auge sieht die Gegenstände des Gesichtsfeldes wie in einer vom Occipitalpunkte aus entworfenen stereographischen Projektion, diese vom Occipitalpunkte selbst aus betrachtet. Es ist dieselbe Art der Projektion, wie sie bei geographischen Karten für Erdhalbkugeln immer angewendet wird.

In der Tat liegen die im Sehfelde als ungekrümmt erscheinenden Richtkreise in Ebenen, die durch den Occipitalpunkt gehen, und müssen sich also von dort gesehen als geradlinig projizieren. Tangential gerichtete Erstreckungen längs der Peripherie des Sehfeldes müssen relativ größer als ihnen parallele Strecken in der Mitte des Feldes erscheinen, weil erstere dem Auge näher sind, als letztere. Dazu kommt nun noch, daß in der Tat das Sehfeld jedes Auges, welches geometrisch genommen von rechts nach links etwa 180 Grade einnimmt, scheinbar viel enger ist. Denn die äußersten nach rechts und links gelegenen Objekte, welche wir noch im indirekten Sehen erkennen können, und deren gerade Verbindungslinie durch unser Auge hindurchgeht, erscheinen uns doch noch immer, wie vor uns liegend, als ob die zu ihnen geführten Richtungslinien des Sehens einen stumpfen oder auch wohl rechten Winkel miteinander bildeten. Namentlich wenn man nach dem Himmel blickt, so daß man keine irdischen Objekte von bekannter Lage und Größe im Sehfelde hat, so scheint das helle Feld, welches man vor sich hat, etwa den Durchmesser eines rechten Winkels von rechts nach links, noch weniger sogar von oben nach unten zu haben, wo Augenbrauen und Wange das Feld etwas verengern. Es macht den Eindruck, als blickte man aus einer gewissen Tiefe des Kopfes hervor die Außenwelt.

Das eben angeführte geometrische Bild möchte ich nur als solches betrachtet wissen; es faßt die Hauptzüge der scheinbaren Verteilung im Sehfelde zusammen, aber nicht alle. Die scheinbare Verkürzung der radial gerichteten, vom Hauptblickpunkte auslaufenden Strecken nahe der Peripherie, die namentlich am unteren und oberen Rande des Gesichtsfeldes deutlich vorhanden ist, wird durch jenes Bild nicht gegeben. Gleiche radiale Strecken würden vielmehr in allen Teilen des Feldes gleichgroß erscheinen, da sie für das im Rückenpunkt der Kugel gelegene Auge durch gleiche Peripheriewinkel gemessen werden, wie für das im Mittelpunkte befindliche durch gleiche Zentriwinkel. Zu gleichen Zentriwinkeln gehören aber bekanntlich gleiche Peripheriewinkel.

Auch die scheinbare Abweichung der vertikalen Meridiane und des Verhältnisses der vertikalen und horizontalen Dimensionen ist nicht berücksichtigt.

Wir kommen jetzt zu der Untersuchung, wie kann eine solche Ausmessung des Sehfeldes entstehen.

Im Sinne der nativistischen Theorie ist sie durch gewisse organische Einrichtungen von Geburt auf gegeben, eine Erklärung aus den Gesichtserscheinungen also nicht weiter zu suchen.

Die empiristische Theorie aber wird versuchen müssen, eine solche Erklärung zu finden. Wir setzen dabei voraus, daß das Bewegungsgesetz der Augen ausgebildet sei, was, wie im vorigen Paragraphen gezeigt wurde, ohne eine Kenntnis der Lokalisation der Eindrücke im Gesichtsfelde geschehen kann, infolge des Bestrebens, die Veränderungen der Eindrücke bei Bewegung des Auges als abhängig von dieser Bewegung und nicht von Änderungen der äußeren Objekte zu konstatieren. In Wirklichkeit mag, wie schon früher bemerkt wurde, die Ausbildung des Augenmaßes sich teilweise gleichzeitig mit dem Gesetz der Bewegungen entwickeln und die ganze Einübung nicht so methodisch und in einzelne Stadien getrennt vor sich gehen, wie wir es hier der Übersichtlichkeit wegen haben darstellen müssen. Im wesentlichen wird dadurch nichts geändert.

Wir haben im Anfange dieses Paragraphen auseinandergesetzt, wie unter Hilfe der Bewegungen des Auges zunächst ermittelt werden kann, in welcher Reihenfolge die Objekte und die durch besondere Lokalzeichen charakterisierten ihnen entsprechenden Netzhautpunkte in der Fläche jene des Gesichtsfeldes, diese der Netzhaut geordnet sind. Es blieb nur noch übrig, die Entstehung der bestimmten Größenverhältnisse zu erörtern.

Wir haben dann gesehen, wie die Kenntnis gewisser Linien im Blickfelde, die in allen ihren Teilen übereinstimmende Richtung haben, und als in sich selbst verschiebbar wahrzunehmen sind, der Richtlininien, durch das ausgebildete Bewegungsgesetz der Augen gewonnen werden kann.

Wenn wir nun irgend ein Objekt im indirekten Sehen wahrnehmen, von ihm also einen begrenzten Eindruck auf einen seitlichen Teil der Netzhaut erhalten haben, und dann den Blick jenem Objekte zuwenden, so erhalten wir hinterher einen Eindruck desselben Objekts mit seiner gleichen scheinbaren Größe auch auf dem Zentrum der Netzhaut, und können also aus Erfahrung allmählich lernen, welchem zentralen Eindrucke ein gewisser peripherischer in Qualität und Größe gleich gilt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, auch mittels des indirekten Sehens, soweit dessen Genauigkeit ausreicht, Objekte ihrer Form und scheinbaren Größe nach beurteilen zu lernen.

Neben der Größe und Form wird aber auch eine Vergleichung der Richtung des erst indirekt und dann direkt gesehenen Objektes mit dem zuerst direkt

gesehenen eintreten, es wird wahrgenommen werden, welche Linien beider Objekte sich auf denselben Meridianen der Netzhaut abbilden. Diese Vergleichung der Lage wird allerdings etwas verschieden ausfallen müssen, je nachdem wir von der Primärstellung oder von einer Sekundärstellung des Blicks ausgehen, obgleich das für normalsichtige Augen geltende LISTINGsche Gesetz die Summe dieser Verschiedenheiten so klein als möglich macht. Im Mittel aller Fälle aber wird die Vergleichung so ausfallen, als wäre das erste Objekt in der mittleren Stellung, d. h. in der Primärstellung fixiert worden. Außerdem ist schon früher hervorgehoben worden, daß die Primärstellung als die bequemste und zur Orientierung vorteilhafteste am meisten vom Auge eingenommen wird, und daß wir Bewegungen, welche mit Drehung um die Blicklinie verbunden sind, zu vermeiden suchen. So werden wir also durch Erfahrung kennen lernen können, welche Richtungen in den Seitenteilen des Sehfeldes übereinstimmen mit den durch den Fixationspunkt gezogenen Linien, und diese Übereinstimmung wird sich als Regel so feststellen, wie sie stattfindet, wenn der Fixationspunkt auch Hauptblickpunkt ist, d. h. **sämtliche Linienelemente ein und derselben Richtlinie werden im Sehfelde übereinstimmende Richtung zu haben scheinen, und sämtliche Richtlinien, die im Occipitalpunkt einen und denselben Meridian des Sehfeldes tangieren, werden übereinstimmende Richtung haben.**

Nun tritt aber diese Bestimmung der Linien von übereinstimmender Richtung in Widerspruch mit den Bestimmungen der scheinbaren Größe, welche bei Vergleichung der direkt und indirekt gesehenen Objekte anzustellen sind. Linien von übereinstimmender Richtung im Sinne unserer Definition dieses Begriffs können sich nämlich nicht schneiden, denn wo sie sich schneiden, würden sie nicht in übereinstimmender Richtung erscheinen können. Sie erscheinen uns vielmehr tatsächlich parallel und überall in gleichem Abstande. Dadurch wird es aber bedingt, wie wir oben gesehen haben, daß die tangential gerichteten peripherischen Strecken relativ zu groß erscheinen.

Daß wir bei diesen Vergleichungen die Richtung der übereinstimmenden Linien mehr berücksichtigen als die Größe der Objekte, hängt wohl davon ab, daß wir bei undeutlichen und verwaschenen Bildern, wie die peripherischen des Sehfeldes in hohem Grade sind, Richtungen von Linien noch ziemlich gut und genau erkennen können, wenn die Form und Dimensionen des Objekts nur noch sehr ungenau erkannt werden. Wenn man eine feine schwarze Linie unter Umständen betrachtet, wo man nicht für sie akkommodieren kann und sie als einen verwaschenen Schattenstreifen sieht, so wird man ihre Breite gar nicht, ihre Länge nur sehr unvollkommen bemessen, ihre Richtung aber noch sehr genau mit der eines scharf gesehenen Fadens vergleichen können, indem man diesen dem Rande des Schattenstreifens parallel oder auch gerade in die Mitte des Schattens einstellt. Nun machen die Bilder in den Seitenteilen des Sehfeldes ungefähr denselben subjektiven Eindruck, wenn auch aus einem ganz anderen Grunde, wie Bilder, die wegen schlechter Akkommodation sehr verwaschen sind, und es scheint mir deshalb die Annahme zulässig, und wird auch, wie mir scheint, durch direkte Beobachtung bestätigt, daß man die Richtung der durch sie verlaufenden Linien verhältnismäßig viel sicherer bestimmt, als die Größe der dort befindlichen Objekte. Es wird mir wenigstens viel schwerer, mich über die Stellung zu entscheiden, die ich nehmen muß, um die äußeren Felder des Schachbrettmusters Fig. 22 gleich breit mit den

mittleren zu sehen, als es der Fall ist, wenn ich die Linien gerade gestreckt sehen will.

Daß an den äußersten Grenzen des schachbrettförmigen Feldes die Richtlinien noch etwas gekrümmt erschienen, erklärt sich daraus, daß von der Primärstellung ausgehend diese Stellen nur mit angestrengter Seitenwendung des Auges zu erreichen waren, wie wir sie gewöhnlich nicht anwenden. Um sie mit dem Blicke ohne ungewöhnliche Anstrengung erreichen zu können, mußte der Blicklinie für das Zentrum der Scheibe eine Wendung nach der entgegengesetzten Seite gegeben werden. Bei solcher Stellung aber würden die Richtlinien des Sehfeldes an der betreffenden Stelle der Peripherie wirklich weniger gekrümmt, als die Hyperbeln.

In dem mittleren deutlich gesehenen Teile des Sehfeldes können wir, wegen seiner geringen Ausdehnung von der Krümmung der Kugelfläche und der auf ihr gezogenen Richtlinien, absehen. Wir können in diesem Teile des Sehfeldes übereinstimmende Richtlinien als parallele gerade Linien betrachten. Hier muß auch die Vergleichung der Form, Größe und Lage der Objekte, wenn wir sie bald indirekt, bald direkt betrachten, übereinstimmende Resultate geben. Hier wird also auch eine genauere Vergleichung indirekt gesehener Strecken mit parallelen direkt gesehenen möglich werden, während unsere Vergleichungen solcher Strecken von den peripherischen Teilen des Gesichtsfeldes sehr unsicher und fehlerhaft sind. Nicht übereinstimmende Strecken werden aber auch in der Mitte des Gesichtsfeldes nicht unmittelbar, sondern nur mit Hilfe von Drehungen des Kopfes oder des Objekts verglichen werden können, eine Art der Vergleichung, welche notwendig viel unvollkommener ist, als die durch Drehung des Auges allein.

Die oben angegebenen Tatsachen lehren nun auch weiter, daß man in der Tat solche Linien und Winkel, welche übereinstimmende Lage haben, und deshalb mit denselben Netzhautpunkten zur Deckung gebracht werden können, leicht und gut auch der Größe nach miteinander vergleicht, während die Größenverhältnisse solcher Linien und Winkel, die nicht übereinstimmende Lage haben, sowohl eine beträchtliche Unsicherheit, als auch gewisse regelmäßige konstante Fehler bei der Vergleichung zeigen. Bis zu einem gewissen Grade lernen wir natürlich auch Linien und Winkel vergleichen, die nicht übereinstimmende Lage haben, wie die Seiten und Winkel eines Quadrats oder eines gleichseitigen Dreiecks, indem wir entweder die Objekte vor uns haben und herumdrehen, so daß wir sie in verschiedener Stellung erblicken, oder indem wir unseren Kopf drehen. Beides geschieht aber nicht so häufig, nicht in so regelmäßig wiederkehrender Weise, wie die bloße Bewegung des Auges, daher die Übung in bezug auf die Vergleichung von Objekten nicht übereinstimmender Lage natürlich sehr mangelhaft bleibt.

Bei einer unsicheren Wahrnehmung wird nun unser Urteil auch leicht durch andere Motive, die darauf Einfluß haben, irre geleitet. Wir werden sehen, daß die Täuschung über die Größe der rechten Winkel in einer ganz besonderen Beziehung zum zweiäugigen Sehen steht und deshalb bei verschiedenen normalsichtigen Individuen auch in ziemlich übereinstimmender Größe wiederkehrt. Die Täuschung, durch welche uns vertikale Linien zu groß erscheinen im Vergleich zu horizontalen, zeigt dagegen sehr große Differenzen bei verschiedenen Individuen, und hier finde ich auch bei mir selbst das Urteil sehr wechselnd und sehr unsicher. Dabei mag vielleicht von Einfluß sein, daß

die meisten Figuren der Art, gegen welche wir unsere Stellung so wechseln, oder deren Stellung gegen uns wir so wechseln lassen können, daß ihre verschieden gerichteten Linien und Winkel sich nacheinander auf denselben Netzhautpartien abbilden, solche sind, die auf dem Fußboden gezogen sind, oder auf ebenen Tafeln, die wir, wie unsere Bücher, so in der Hand halten, daß ihr unteres Ende dem Auge näher ist, als das obere. Warum wir diese Haltung wählen, wird sich in der Lehre vom Horopter zeigen. Bei solcher Lage der Linien erscheinen aber in der Tat vertikale Linien immer in perspektivischer Verkürzung, und wir können dadurch geneigt werden, sie immer für länger zu halten, als sie ihrer scheinbaren Größe nach sind.

Übrigens ist ferner ersichtlich, daß wenn einmal durch irgendwelche Motive festgestellt ist, welcher Meridian für senkrecht gehalten werden soll, und welches Längenverhältnis vertikaler und horizontaler Linien gleich der Einheit erscheinen soll, daß dann auch die scheinbare Lage jedes anderen Punktes im Sehfelde bestimmt ist.

Wenn wir uns hierbei beschränken auf den mittleren Teil des Sehfeldes, welcher annähernd als Ebene betrachtet werden kann, so können wir uns die geometrische Lage der Punkte durch rechtwinkelige Koordinaten gegeben denken. Es sei in Fig. 23 AB die dem Netzhauthorizont entsprechende Horizontale, CA eine Vertikale, A der Blickpunkt. Dem entspreche die scheinbare Lage im Sehfelde ab für den Netzhauthorizont, ac für den vertikalen Meridian. Es sei der Punkt F im geometrischen Sehfelde abstehend um zwei Längeneinheiten von der Achse AB, um drei von der Achse AC. Tragen wir auf ab drei Längeneinheiten ab gleich denen von AB, und auf ac die Linie ad, welche zwei Längeneinheiten von AC gleich lang erscheint, und vervollständigen das Parallelogramm $abdf$, so ist f die scheinbare Lage von F, denn der Konstruktion gemäß müssen alle einzelnen Linienstücke und Winkel der beiden Figuren einander gleich erscheinen.

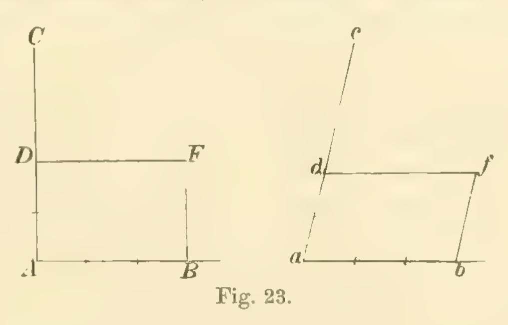


Fig. 23.

Die scheinbare Lage der Punkte im mittleren, scharf gesehenen Teile des Sehfeldes, welchen wir als Ebene betrachten können, wird also nach der vorgetragenen Theorie, wie es auch in der Tat der Fall ist, aus der geometrischen hergeleitet werden, wenn wir die Punkte aus einem rechtwinkeligen Koordinatensystem in ein schiefwinkeliges mit verändertem Achsenverhältnis übertragen. Indessen läßt sich auch, wie aus bekannten Sätzen der analytischen Geometrie erhellt, in solchen Fällen immer eine bestimmte Achsenrichtung eines rechtwinkeligen Systems angeben, an dem die Übertragung dadurch vorgenommen werden kann, daß nur die der einen Achse parallelen Koordinaten in einem bestimmten Verhältnisse verkürzt oder verlängert werden. Die Winkel und Achsenverhältnisse, welche diesen Umformungen zugrunde zu legen sind, sind schon oben angegeben.

Ich muß hier noch bemerken, daß die beschriebenen tatsächlichen Verhältnisse nicht passen zu zwei anderen Theorien, die über die Ausmessung des Sehfeldes aufgestellt worden sind. Eine Anzahl von Physiologen hat sich der

Annahme von J. Müller angeschlossen, daß die Netzhaut die Fähigkeit hätte, ihre eigenen räumlichen Dimensionen wahrzunehmen. Dann würden die tangential gerichteten Strecken nahe der Peripherie des Sehfeldes nicht zu groß, wie sie es tun, sondern vielmehr zu klein erscheinen müssen, da, wie der Querschnitt des Auges Bd. I, Fig. 2, S. 3 lehrt, die Netzhaut gegen ihren vorderen Rand an der *Ora serrata g g* hin beträchtlich enger wird, als eine um den Knotenpunkt beschriebene Halbkugel. Wie es sich unter dieser Annahme mit den radialen Dimensionen verhalten müßte, läßt sich nicht gut entscheiden, da die Brechung der Strahlen, welche sie bei so schiefem Einfall in Richtung zur Achse hin erleiden, und die Lage des Netzhautbildes nicht genau bestimmt werden können.

Eine zweite Annahme, die zur Erklärung der Ausmessung des Sehfeldes gebraucht worden ist, ist von mehreren Physiologen aus E. H. Webers Versuchen über die Empfindungskreise der Haut und der Netzhaut hergeleitet worden, freilich wohl kaum, wie mir scheint, im Sinne dieses Autors.[1] Danach sollen die kleinsten räumlich unterscheidbaren Ausdehnungen als Einheiten des Flächenmaßes benutzt werden. Räumliche Trennung zweier Eindrücke kann, wie schon Bd II, S. 29 erörtert wurde, nur wahrgenommen werden, wenn zwischen zwei erregten Flächenelementen ein nicht erregtes oder anders erregtes übrigbleibt und wahrgenommen werden kann. Die Größe der kleinsten unterscheidbaren Flächenelemente ist nun an verschiedenen Teilen der Netzhaut sowohl, wie außer Weber auch Aubert und Förster erwiesen haben, als auch an verschiedenen Stellen der Haut sehr verschieden, so daß die Entfernung der erregten Punkte an verschiedenen Teilen sehr verschieden groß gewählt werden muß, wenn man sie als zwei unterscheiden soll. Setzt man also zwei Zirkelspitzen auf eine Stelle der Haut, wo ihre Distanz kleiner als die kleinsten unterscheidbaren Entfernungen ist, so verschmelzen ihre Eindrücke in einen, man glaubt nur mit einer Spitze berührt zu sein. Setzt man sie auf eine Stelle auf, wo ihre gesonderte Unterscheidung nur undeutlich erfolgt, so ist man allerdings geneigt, sie für näher zu halten, als sie wirklich sind; setzt man sie endlich an feiner unterscheidenden Teilen auf, wo ihre Trennung leicht erkannt wird, so erkennt man, wie ich wenigstens finde, richtig ihre wahre Distanz. So erscheinen mir also zum Beispiel Zirkelspitzen von vier Linien Distanz an der Zungenspitze, an der Fingerspitze, an den Lippen in gleicher Entfernung voneinander, obgleich an den Lippen ein Abstand von $^1/_2$ Linie unterschieden wird, an der Fingerspitze dagegen nur einer von 1, an den Lippen von 2 Linien. Dagegen am Kinn und unterhalb des Kinnes, wo die Unterscheidung der Spitzen bei der genannten Distanz schwierig und unsicher wird, erscheinen sie mir, wenn ich sie unterscheide, wohl etwas näher zusammengerückt zu sein, als sie wirklich sind, nach dem allgemeinen Gesetze des Empfindens, wonach deutlich wahrnehmbare Unterschiede größer erscheinen als undeutlich wahrnehmbare. Aber doch scheinen sie mir am Halse, solange ich sie überhaupt noch unterscheiden kann, niemals so nahe zu sein, als wenn ich die Spitzen eine halbe Linie oder eine Linie voneinander entfernt, an die Zungenspitze ansetze. Die kleinsten unterscheidbaren Größen erscheinen also keineswegs an allen Stellen der Haut gleich groß, sondern sie erscheinen sehr verschieden groß.

---

[1] E. H. Weber über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Berichte der Sächs. Ges. 1852. S. 85—164.

Ebenso verhält es sich auf der Netzhaut. Wenn ich zwei kleine schwarze Kreise von 2 mm Durchmesser und ebensoviel gegenseitigem Abstand im indirekten Sehen betrachte, und eine Stelle suche, wo sie zuerst mir anfangen sichtbar zu werden, so erscheinen sie mir dort keineswegs näher aneinanderzustehn, als sie wirklich sind, und jedenfalls nicht im entferntesten so nahe, als zwei mit dem Zentrum der Netzhaut fixierte Punkte, die an der Grenze der Unterscheidbarkeit sind.

Ich glaube deshalb, daß es eine unzulässige Erweiterung der WEBERschen Theorie von den Empfindungskreisen ist, wenn man diesen Kreisen überall dieselbe scheinbare Größe zuschreiben und sie als elementare Maßeinheiten der Raumabmessungen benutzen will. Für das Auge würde aus einer solchen Annahme in der Tat auch folgen, daß die ganze Peripherie des Sehfeldes in allen Dimensionen relativ viel kleiner erscheinen müßte, als Objekte gleicher Winkelgröße in der Mitte des Sehfeldes. Wir haben im Gegenteil gesehen, daß die tangentialen Richtungen vergrößert erscheinen; die radialen allerdings, wenigstens am oberen und unteren Rande des Sehfeldes verkleinert.

Damit steht es keineswegs in Widerspruch, daß bei der Ausmessung sehr kleiner Abstände, für deren Beurteilung das mittels der Augenbewegungen ausgebildete Augenmaß nicht genau genug ist, die Empfindungskreise, wie schon oben bemerkt wurde, benutzt werden. Wir kommen auf diese Fragen übrigens bei den Phänomenen des blinden Flecks weiter unten noch einmal zurück.

Außer den hier beschriebenen allgemeinen Täuschungen über die Größenverhältnisse des Sehfeldes, welche vom Gesetz der Augenbewegungen und von der Art, wie wir unser Sehfeld kennen lernen, abhängig sind, gibt es noch eine Reihe von Täuschungen, welche von besonderen Eigentümlichkeiten der betrachteten Figuren abhängen, aber auch interessant sind, weil sie mehr oder weniger deutlich die Motive kennen lehren, denen wir bei der Schätzung der Größe und Formen im Sehfelde folgen.

Man kann die hier in Betracht kommenden Phänomene meist auf die schon bei den Kontrasterscheinungen aufgestellte Regel zurückführen, daß deutlich zu erkennende Unterschiede bei allen Sinneswahrnehmungen größer erscheinen, als undeutlich zu erkennende Unterschiede von gleicher objektiver Größe. Eine erste Folge davon ist, daß wir eine geteilte Raumgröße leicht für größer halten, als eine ungeteilte, weil die direkte Wahrnehmung der Teile uns deutlicher erkennen läßt, daß die betreffende Größe so viel und so große Teile enthalte, als wenn die Teile nicht erkennbar abgezeichnet sind. So wird man in der nebenstehenden Linie Fig. 24 leicht das Stück ab gleich bc halten, obgleich in der Tat ab größer ist als bc. Eine Reihe von Messungen über diese Art der Täuschung ist von A. KUNDT[1] ausgeführt worden. Er blickte nach fünf stählernen Spitzen A, B, C, D, E, die hinter einem Schirme so hervorragten, daß die Entfernung $AB = 20{,}2$ mm, $BC = 40{,}2$ mm, $AE = 241{,}9$ mm war. Die Spitze D wurde nach dem Augenmaße in die Mitte eingestellt. Wäre sie wirklich in der Mitte gewesen, so hätte die Entfernung CD betragen müssen 60,55 mm. Sie wurde aber im Mittel aus 120 Versuchen eines Beobachters gemacht gleich

Fig. 24.

[1] POGGENDORFFS Annalen CXX. S. 118.

57,87 mm, so daß die scheinbare Mitte um 2,68 mm nach Seite der Spitzen *A*, *B* und *C* von der Mitte hin entfernt lag. Bei einem anderen Beobachter ergab sich im Mittel aus 120 Versuchen die Abweichung gleich 3,95 mm. Die Entfernung der Spitze *D* vom Knotenpunkte des Auges betrug in allen Fällen 338 mm.

Zu bemerken ist, wie bei diesen Versuchen sich herausstellte, daß das rechte Auge die rechte Hälfte einer zu halbierenden Distanz größer zu machen strebt, das linke Auge die linke Hälfte. Der erste Beobachter machte die dem gebrauchten Auge entsprechende Hälfte um 2,24 mm, der zweite um 4,77 mm größer als die andere.

Bei den beschriebenen Versuchen werden Distanzen verglichen, welche mit denselben Netzhautpunkten zur Deckung gebracht werden können. Viel auffallender werden die Täuschungen, wenn die zu vergleichenden Distanzen verschiedene Richtung haben.

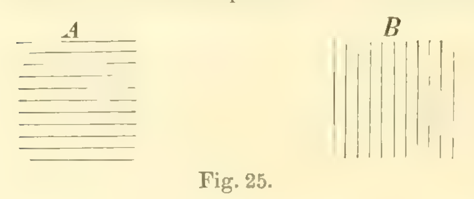


Fig. 25.

Man betrachte Fig. 25 *A* und *B*: die beiden liniierten Flächen sind richtig gezeichnete Quadrate. Beide sollten höher als breit erscheinen der oben besprochenen Täuschung gemäß. Das ist bei *A* auch in übertriebenem Maße der Fall; *B* sieht umgekehrt zu breit aus.

Dasselbe gilt für Winkel; man betrachte Fig. 26. Die Winkel *1*, *2*, *3*, *4* sind rechte Winkel, und sollten, mit beiden Augen gleichzeitig betrachtet, so erscheinen. Aber *1* und *2* erscheinen spitz, *3* und *4* stumpf; noch stärker wird die Täuschung, wenn man die Figur nur mit dem rechten Auge betrachtet; mit dem linken gesehen, sollten dagegen *1* und *2* stumpf erscheinen, wegen der oben erwähnten Abweichung des vertikalen Meridians; sie erscheinen aber nur etwa als rechte, in ihrer wahren Form. Dreht man die Figur, daß *2* und *3* nach unten sehen, so erscheint im Gegenteil *1* und *2* dem linken Auge übertrieben spitz, dem rechten richtig. Es erscheinen die geteilten Winkel also verhältnismäßig immer größer, als sie ohne die Teilung erscheinen würden.

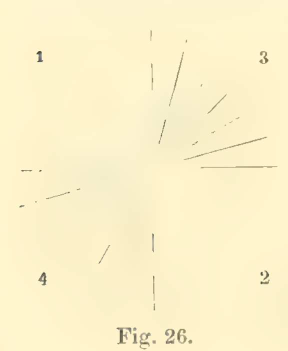


Fig. 26.

Die Fig. 27 zeigt zwei gleichseitige Dreiecke; *A*, was horizontal geteilt ist, erscheint viel zu hoch, wie es auch ohne die Liniierung der Fall sein würde. In *B* dagegen erscheint der Winkel rechts an der Grundlinie größer als der links und die Spitze des Dreiecks nach rechts herübergerückt. Derselbe Einfluß zeigt sich bei vielen aus dem gewöhnlichen Leben bekannten Beispielen. Ein leeres Zimmer sieht kleiner aus als ein möbliertes, eine mit einem Tapetenmuster bedeckte Wand größer als eine einfarbig angestrichene. Damenkleider mit Querstrichen lassen die Figur höher erscheinen. Ein bekannter gesellschaftlicher Scherz ist es, daß man jemandem einen zylindrischen Herrnhut zeigt und ihn auffordert, an der Wand vom Fußboden ab anzuzeigen, wie hoch der Hut sei. Er macht ihn in der Regel anderthalb mal zu hoch.

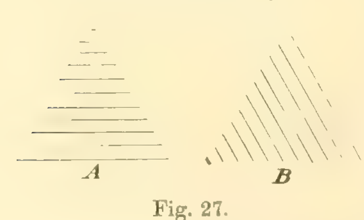


Fig. 27.

Hierher möchte auch eine von BRAVAIS[1] beobachtete Tatsache gehören. Er berichtet: Wenn ein Beobachter, der sich auf dem Meere in einer gewissen Entfernung von einer Küste befindet, welche große Unregelmäßigkeiten des Terrains darbietet, dieselbe so zeichnet, wie sie dem Auge erscheint, so findet er durch vergleichende mathematische Ermittlung, daß in der so erhaltenen Zeichnung die horizontalen Lineargrößen nach den gehörigen Verhältnissen untereinander, die vertikalen Winkeldistanzen aber nach einem doppelten Maßstabe geschätzt sind. Diese Täuschung, der man unwillkürlich bei dieser Art Schätzungen unterliegt, ist nicht individuell, wie man glauben könnte, vielmehr beweisen zahlreiche Beobachtungen ihre Allgemeinheit. An diese Fälle schließen sich verschiedene in neuerer Zeit bekannt gemachte optische Täuschungen an.

Man betrachte Fig. 28 *A*. Nicht *d* erscheint als Fortsetzung der Linie *a*, was es in der Tat ist, sondern vielmehr *f*, welches etwas niedriger liegt. Noch auffallender ist diese Täuschung, wenn die Figur in kleinerem Maßstabe ausgeführt ist, wie in *B*, wo die beiden Stücke der dünnen Linien wirklich Verlängerungen voneinander sind, aber nicht so scheinen, und in *C*, wo sie so scheinen, aber es nicht sind. Zeichnet man solche Figuren wie *A*, ohne das Stück *d*, und betrachtet sie aus immer größerer Entfernung (indem nötigenfalls die Akkommodation des Auges durch Brillengläser verbessert wird), so daß sie in immer kleinerer scheinbarer Größe erscheinen, so findet man, daß man *f* immer weiter herunterrücken muß, damit es als Verlängerung von *a* erscheine, je ferner und scheinbar kleiner die Figur ist.

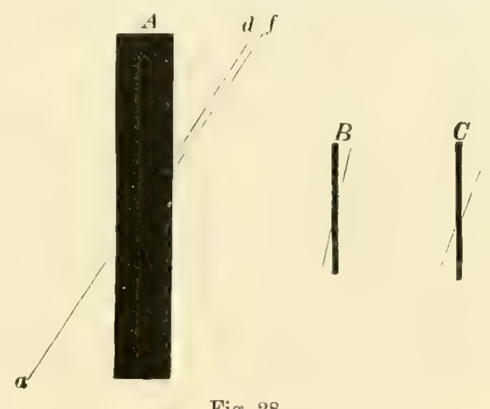


Fig. 28.

Macht man die dünnen Linien lang wie in Fig. 29 *A*, so wird man bemerken, daß sie in der Nähe der breiteren schwarzen Linie so eingebogen erscheinen, wie ich etwas übertrieben in *B* gezeichnet habe, daß die entfernteren Enden der dünnen Linie allerdings ganz richtig als Verlängerungen voneinander erscheinen, und daß nur durch jene Einbiegungen in der Nähe der sie schneidenden starken Linie der Schein entsteht, als träfen sie nicht aufeinander.

Es sind dies nun gerade die Erscheinungen, welche in diesem Falle die Irradiation hervorbringen muß, und es ist schwer zu scheiden, was ihr angehört und was etwa noch daran durch solche Umstände, wie sie teils schon erwähnt sind, teils bei den folgenden Täuschungen noch erwähnt werden sollen, bewirkt wird. Daß Irradiation auch von schwarzen Linien auf weißem Grunde vorkommt, ist schon oben Bd. II, S. 159—161 erörtert worden. Nahe dem Scheitel der beiden spitzen Winkel treffen die Zerstreuungskreise der beiden schwarzen Linien zusammen und verstärken sich gegenseitig; dadurch rückt das Maximum des Dunkels in dem Netzhautbilde der schmalen Linie dem breiten Streifen

[1] FECHNER, Zentralblatt, 374—379; 558—561.

näher und sie erscheint gegen diesen hingelenkt. Bei den in größerem Maßstabe gezeichneten Figuren derselben Art, wie Fig. 28 *A*, kann indessen kaum Irradiation der einzige Grund sein.

Die Fig. 30 *A* und *B* zeigt Beispiele, welche von HERING angegeben wurden die geraden und parallelen Linien *a b* und *c d* erscheinen in *A* nach außen, in *B* nach innen gebrochen.

Am auffallendsten aber ist das in Fig. 31 gegebene, von ZOELLNER veröffentlichte Beispiel. Die vertikalen schwarzen Streifen der letzteren Figur sind einander parallel, erscheinen aber konvergent und divergent, so daß sie immer in entgegengesetzter Richtung von der Vertikalen abzuweichen scheinen, als die kurzen schrägen Striche, von denen sie geschnitten werden. Dabei sind die Hälften der schrägen Striche so gegeneinander verschoben, wie die Hälften der schmalen Linien in Fig. 28. Dreht man die Zeichnung so, daß die breiten Vertikalstriche unter 45° gegen den Horizont geneigt erscheinen, so wird die scheinbare Konvergenz auffallender, dagegen die scheinbare Verschiebung der Hälften der dann horizontal und vertikal liegenden Querstriche weniger auffallend. Die vertikalen und horizontalen Linien werden also im ganzen weniger in ihrer Richtung verändert, als die schräg durch das Gesichtsfeld laufenden.

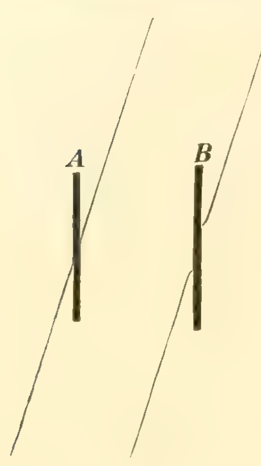


Fig. 29.

Diese zuletzt beschriebenen Täuschungen kann man betrachten als neue Beispiele für die oben gegebene Regel, daß spitze Winkel, als deutlich abgegrenzte kleine Größen, in der Regel verhältnismäßig zu groß erscheinen, wenn wir sie mit stumpfen oder rechten ungeteilten Winkeln vergleichen. Wenn nun die scheinbare Vergrößerung eines spitzen Winkels so geschieht, daß seine

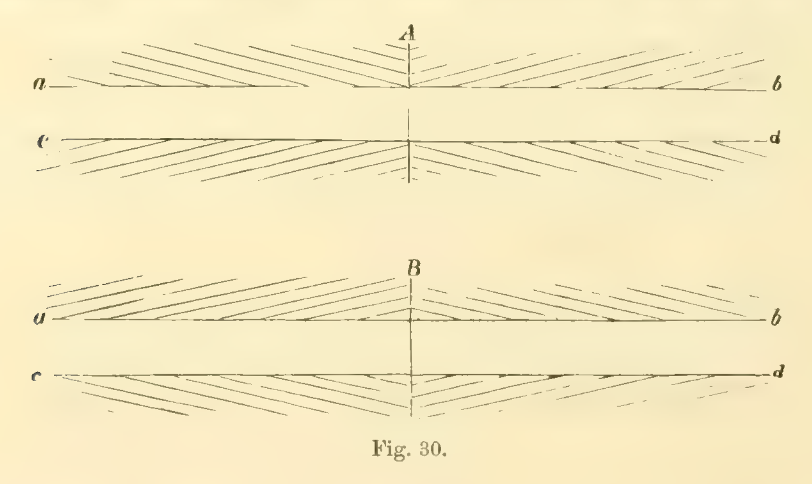


Fig. 30.

beiden Schenkel scheinbar nach außen rücken, so müssen die Täuschungen Fig. 28, 30 und 31 eintreten. In Fig. 28 würden sich die dünnen Linien dabei scheinbar um den Punkt drehen, wo sie in den dicken Streifen eintreten und dann nicht mehr in gegenseitiger Verlängerung liegen. In Fig. 30 werden die beiden Hälften jeder der beiden geraden Linien immer scheinbar so verstellt,

daß sich die spitzen Winkel, die sie mit den schrägen Linien machen, vergrößern. Dasselbe geschieht scheinbar mit den Vertikalstreifen der Fig. 31.

Indessen ist in den Fällen von Fig. 30 und 31 die angegebene Ursache unter gewöhnlichen Verhältnissen nur an einem kleinen Teile der Wirkung schuld; und der größere Teil der Wirkung hängt, wie ich gefunden habe, von Bewegungen der Augen ab. Die genannten Täuschungen schwinden nämlich ganz, oder bleiben nur in schwachen Resten bestehen, wenn ich einen Punkt der Zeichnungen so fixiere, wie es nötig sein würde, um ein Nachbild zu entwickeln, und wenn es gelingt, ein scharf gezeichnetes Nachbild zu erhalten, was namentlich für das Zoellnersche Muster Fig. 31 möglich ist, so ist in dem Nachbilde keine Spur der Täuschung mehr zu erkennen.

In Fig. 28 hat Bewegung des Blicks keinen deutlichen Einfluß auf Verstärkung der Täuschung, im Gegenteile verschwindet diese, wenn ich der dünnen Linie *ad* mit dem Blicke folge. Dagegen verschwindet die Täuschung umgekehrt durch Fixation verhältnismäßig leicht bei Fig. 30, schwerer bei Fig. 31. Doch kann ich sie auch bei dieser letztern Figur beseitigen, wenn ich fest fixiere und nicht die schwarzen Streifen als Objekte, die auf weißem Grunde liegen, betrachte, sondern die weißen Streifen gleichsam als Zweige mit Fiederblättchen, die auf schwarzem Grunde liegen, aufzufassen suche. Sobald mir dies gelingt, sehe ich alles richtig. Sowie ich dann aber anfange, den Blick über die Zeichnungen hin zu bewegen, ist die Täuschung in voller Stärke wieder da.

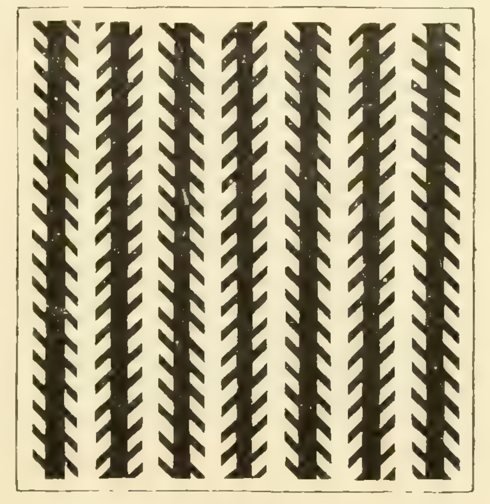


Fig. 31.

Auch gelingt es bei diesen Figuren die Täuschung ganz oder fast ganz zu vermeiden, wenn man sie zuerst mit einem undurchsichtigen Papiere bedeckt, über dieses eine Nadelspitze als Fixationspunkt unbeweglich hinhält, und während man diese ganz scharf und sicher fixiert, das bedeckende Papier zwischen ihr und der Zeichnung fortzieht. Ob man gut fixiert hat, kann man nach der Schärfe des dabei ausgebildeten Nachbildes beurteilen.

Die sicherste und leichteste Methode, den Einfluß der Augenbewegungen zu beseitigen, ist die Beleuchtung mittels des elektrischen Funkens, weil während der außerordentlich kurzen Dauer eines solchen Funkens das Auge keine merkliche Bewegung ausführen kann. Dazu benutze ich einen hölzernen innen schwarz angestrichenen Kasten *ABCD*, Fig. 32. Bei *f* in der vorderen und bei *g* in der hinteren Wand waren in der Entfernung der Augen voneinander je zwei Löcher[1] eingebohrt worden. Durch die Löcher *f* blickte der Beobachter hinein, vor die Löcher *g* wurden innen die Zeichnungen befestigt, welche selbst mit einem Nadelstich durchbohrt waren, der auch ohne die elek-

[1] Je zwei Löcher, weil der Apparat namentlich auch für stereoskopische Versuche gebraucht werden sollte.

trische Entladung in dem übrigens ganz dunklen Kasten gesehen und fixiert werden konnte. An seiner untern Seite, die auf der Tischplatte *BD* ruht, ist der Kasten offen; wenn man die Zeichnung wechseln will, kehrt man ihn um und greift hinein. Das Zimmer wurde mäßig dunkel gemacht, so daß der Beobachter die elektrischen Apparate noch sehen und handhaben konnte, daß aber doch im Innern des Kastens nichts außer jenen Nadelstichen sichtbar war. Die Drähte, welche zur Zuleitung der Elektrizität dienen, sind *hi*, bei *k* ist die Unterbrechungsstelle; *l* ist ein Kartenstreifen, der auf der dem Funken zugekehrten Seite weiß ist und das Licht desselben vom Auge des Beobachters abhält, dagegen nach der Zeichnung hinwirft. Die Funken wurden durch die sekundäre Spirale eines großen Induktionsapparates von Ruhmkorff, die mit den Belegen einer Leydener Flasche verbunden war, gegeben. Den Schluß der primären Spirale und deren Unterbrechung brachte der Beobachter mit der Hand hervor[1].

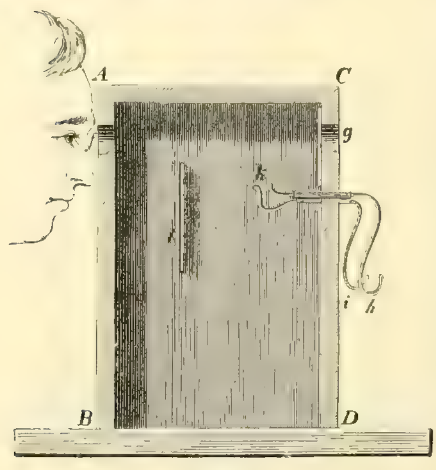


Fig. 32.

Es fand sich, daß bei elektrischer Beleuchtung die Täuschung bei der Fig. 28 unverändert blieb, dagegen bei den Zeichnungen der Fig. 30 ganz schwand, bei Fig. 31 nicht immer ganz fehlte, aber, falls sie eintrat, viel schwächer und zweifelhafter war, als sonst, während doch andererseits die Beleuchtung durch den elektrischen Funken vollkommen genügend war, um die Formen der gerade gesehenen Gegenstände deutlich zu erkennen.

Es sind also zwei verschiedene Erscheinungen zu erklären, nämlich erstens der geringere Grad der Täuschung, der bei Vermeidung der Augenbewegungen eintreten kann, und zweitens die Verstärkung der Täuschung durch Bewegung des Auges. In ersterer Beziehung genügt, wie ich glaube, das Gesetz des Kontrastes, wonach ein deutlich wahrnehmbarer Unterschied größer erscheint, als ein weniger deutlich wahrnehmbarer. Am deutlichsten wahrnehmbar ist im indirekten Sehen die Übereinstimmung der Richtung gleichartiger Raumgrößen. Die Abweichung des Schenkels eines spitzen oder stumpfen Winkels von der Richtung des anderen Schenkels im Schnittpunkt wird deutlicher wahrgenommen, als die Abweichung desselben Schenkels von dem nicht gezeichneten Lot, welches auf dem anderen Schenkel senkrecht steht. Somit erscheint der Unterschied eines Winkels von 0° oder 180° relativ zu groß gegen den von 90°; ein spitzer Winkel also zu groß, ein stumpfer zu klein. Indem diese scheinbare Vergrößerung der Winkel auf beide Schenkel verteilt wird, entstehen die scheinbaren Verschiebungen und Richtungsänderungen der Schenkel. Scheinbare Verschiebungen der Linien, wobei sie ihrer wirklichen Richtung parallel bleiben, werden schwer korrigiert, daher die Täuschung der Fig. 28 verhältnis-

[1] Beim Mangel hinreichend starker elektrischer Apparate kann das von Volkmann konstruierte Tachistoskop dienen (Leipziger Sitzungsber. 1850, S. 90—98), auf welchem ein fallender Schieber für einen Moment die eine oder zwei Öffnungen öffnet, durch die der Beobachter blickt.

mäßig am hartnäckigsten ist. Richtungsänderungen dagegen können durch eine genauere Betrachtung der Figur leichter erkannt werden, wenn dadurch scheinbare Nichtübereinstimmung zwischen übereinstimmenden Linien hervorgebracht worden ist, und nur dadurch, daß in Fig. 30 und 31 die übereinstimmenden Linien, welche verändert erscheinen, durch die große Zahl kreuzender schräger Linien einander im Anblick unähnlich gemacht werden, ist es wohl überhaupt möglich, daß ihre Übereinstimmung übersehen werden kann*.

Jetzt haben wir noch den Einfluß der Bewegung auf die scheinbare Richtung gesehener Linien zu untersuchen. Einfache Versuche zeigen, daß selbst bei einfachen geraden Linien ein solcher Einfluß besteht, wenn die Richtung der Bewegung unter einem spitzen Winkel gegen die Richtung der Linie geneigt ist. Da wir eine überwiegende Neigung haben, bei den Bewegungen unseres Auges der Richtung der hervorstechenderen Linien des Gesichtsfeldes zu folgen, so ist es bei diesen Versuchen nötig, den Blickpunkt im Blickfelde so, wie man es beabsichtigt, zu führen mittels einer Spitze, die man fortdauernd fixiert und über die betreffende Zeichnung hingleiten läßt.

Man ziehe auf einem Papier eine lange gerade Linie *A* und bewege die Spitze, welche man fixiert, in Richtung einer zweiten geraden Linie *B*, welche die erste unter einem sehr kleinen Winkel schneidet. Die zweite gerade Linie braucht nicht gezeichnet zu sein; doch schadet es auch nicht, wenn sie wirklich sichtbar gezogen wird. Wenn man der bewegten Spitze mit dem Blicke folgt, so scheint dabei die gerade Linie *A* auf dem Papier eine Bewegung gegen die Nadelspitze hin oder von ihr weg zu machen, je nachdem sich die Nadel ihr nähert oder von ihr entfernt. Das Bild der Linie *A* verschiebt sich dabei auf der Netzhaut teils parallel sich selbst, teils in Richtung der Breite. Die erstere Bewegung wird wenig oder gar nicht bemerkt, wenn die Linie lang ist und keine deutlich gezeichneten Merkpunkte besitzt; die zweite Bewegung senkrecht zu ihrer Länge wird dagegen desto deutlicher bemerkt.

Dabei scheint auch die Richtung der Linie *A* verändert, und zwar so, daß der Winkel, den sie mit der Linie *B* macht, in der sich die Spitze bewegt, vergrößert erscheint. Das letztere erkennt man am besten, wenn man

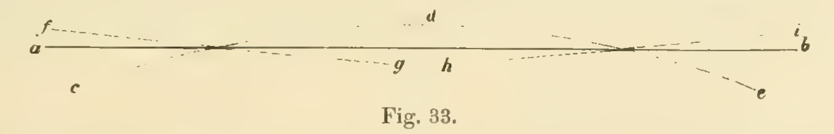


Fig. 33.

eine gerade Linie *ab*, Fig. 33, zieht, und eine Spitze eines Zirkels so auf das Papier aufsetzt, daß die andere sich in dem Bogen *cde* hin- und herbewegen kann. Wenn man dann dieser beweglichen Spitze mit dem Auge folgt, so scheint die Linie *ab* sich abwärts zu bewegen, solange man die Zirkelspitze von *c* nach *d* gehen läßt, aufwärts, wenn sie von *d* nach *e* geht. Gleichzeitig erhält die ganze Linie *ab* scheinbar eine Richtung wie *fg*, solange sich der Blick des Beobachters der Spitze folgend längs *cd* bewegt, und eine Richtung wie *hi*, wenn er sich zwischen *d* und *e* bewegt. Während man bei der Bewegung von *c* nach *e* durch den höchsten Teil des Bogens bei *d* hindurchgeht, verändert die Linie *ab* deutlich ihre Richtung.

* Über die ganze hier behandelte Klasse von Augenmaßtäuschungen vgl. Anm. 3 am Schlusse des Paragraphen. K.

Wenn man nun über das ZOELLNERsche Muster horizontal von rechts nach links eine Nadelspitze führt und ihr mit dem Blicke folgt, so kommt die Figur in die seltsamste Unruhe; der erste, dritte, fünfte schwarze Streifen steigen aufwärts, der zweite, vierte, sechste abwärts; oder umgekehrt, wenn die Richtung der Bewegung umgekehrt wird. Dabei erscheinen die aufwärtssteigenden den abwärtssteigenden nicht parallel, sondern teils gegeneinander, teils auch gegen die Ebene der Zeichnung in entgegengesetzter Weise geneigt, und zwar neigen sich die aufwärtssteigenden mit ihrem oberen Ende der Richtung, in der die Nadelspitze bewegt wird, entgegen, die abwärtssteigenden mit demselben Ende dagegen im Sinne der genannten Richtung, so daß also in besonders auffallender Weise während dieser Scheinbewegung die eigentümliche Täuschung durch die beschriebene Figur zum Vorschein kommt.

Um die Scheinbewegung recht deutlich zu sehen, muß man eine mittlere Geschwindigkeit mit der Nadelspitze einhalten, die weder zu groß noch zu klein sein darf, und muß den Blick ganz fest an die Nadelspitze heften. Wenn es nicht gleich gelingt, kann man auch die Nadelspitze fest stellen und fest betrachten und hinter ihr die Zeichnung vorbeiziehen. Die Ursache der Scheinbewegung ist offenbar dieselbe, wie bei dem oben beschriebenen Versuche mit der einzelnen geraden Linie. Wir nähern uns in geneigter Richtung den schrägen Querstrichen und diese scheinen sich deshalb zu bewegen; sie nehmen dabei die vertikalen schwarzen Streifen, mit denen sie verschmolzen sind, gleichsam mit. Wenn nun der schwarze vertikale Streifen, dem wir uns nähern, dabei eine vertikale Bewegung zeigt nach aufwärts, so ist dies eine ähnliche Erscheinung, als wir haben würden, wenn wir uns ihm nicht in senkrechter Richtung näherten, sondern unter einem spitzen Winkel, dessen Spitze nach abwärts sieht, und umgekehrt bei den abwärtssteigenden Streifen ist die Scheinbewegung dieselbe, als wenn wir uns ihnen näherten unter einem spitzen Winkel, dessen Spitze nach aufwärts sieht. Da nun aber die Richtung der wirklichen Bewegung unseres Blicks für alle Streifen dieselbe ist, so erscheinen uns umgekehrt die Streifen gegen die Bewegungslinie des Blicks geneigt, die aufsteigenden mit dem oberen Ende der Richtung dieser Bewegung entgegen, die absteigenden ihr folgend, wie in Fig. 34 angezeichnet ist, wo *ab* die Richtung bezeichnen soll, in der sich der Blick bewegt, *cc*, *dd*, *ee*, *ff* die scheinbare Lage der vertikalen Streifen in übertriebener Divergenz, und die Pfeile neben diesen letzteren Linien die Richtung, in der sich so gestellte Linien scheinbar bewegen würden, wenn der Blick in Richtung der horizontalen Pfeile fortgeleitet.

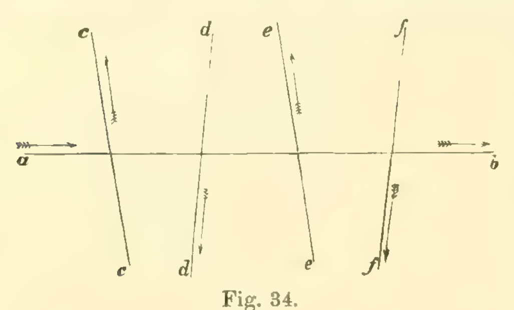


Fig. 34.

Macht man die Bewegung der Spitze, der das Auge folgt, allmählich langsamer, so wird auch die Scheinbewegung langsamer, wird leichter übersehen, kann aber bei einiger Aufmerksamkeit erkannt werden, und gleichzeitig finde ich, daß die scheinbare Divergenz der vertikalen Streifen sich weniger bestimmt zeigt. Ohne Hilfe einer leitenden Spitze kommt weder die Scheinbewegung der Streifen noch ihre scheinbare Divergenz so schön zum Vorschein, wie mit einer solchen, wahrscheinlich weil wir unseren Blick über eine Zeichnung mit

so hervortretenden Liniensystemen nicht so gleichmäßig und so geradlinig hingleiten lassen können. Da übrigens die Täuschung über die Richtung der Streifen mit der über ihre Bewegung gleichzeitig wächst und fällt, so zweifele ich nicht, daß auch die Verstärkung der Täuschung bei den gewöhnlichen Bewegungen des Blicks dieselbe Ursache habe.

Führt man die fixierte Nadelspitze parallel den vertikalen Streifen über die Zeichnung, so wird die Täuschung nicht nur nicht verstärkt, sondern sogar geschwächt oder ganz beseitigt. Die vertikalen Streifen zeigen sich dann als parallele Richtlinien im Blickfelde dadurch, daß ihre Netzhautbilder sich in sich selbst verschieben.

Der hier beschriebene Einfluß der Scheinbewegung der vertikalen Streifen auf die scheinbare Größe des Winkels zwischen ihnen und der Bewegungsrichtung des Blicks läßt sich übrigens ganz ebenso an einem wirklich bewegten Körper zeigen. Man lege einen mit Teilstrichen versehenen Maßstab in horizontaler Richtung auf ein Blatt Papier, setze dicht neben ihm die eine Spitze eines weit geöffneten Zirkels ein und bewege die andere nahe über der Kante des Maßstabes hin und her; sie wird sich dabei genau normal zur Richtung des Maßstabes bewegen. Jetzt bewege man auch den Maßstab in seiner eigenen Richtung hin und her, so wird die Bewegungslinie der Zirkelspitze durchaus nicht mehr senkrecht zur Richtung des Maßstabes, sondern sehr stark geneigt gegen diese erscheinen, wie sie sich denn in der Tat in einem am Maßstabe festen Koordinatensystem wirklich als geneigt darstellen würde, während sie, auf ein absolut festes Koordinatensystem bezogen, senkrecht zur Kante des Maßstabes bleibt. Die Veränderung des Winkels ist übrigens in diesem Falle viel bedeutender als an der Zoellnerschen Figur, weil bei dieser die scheinbare Lagenveränderung nie so weit gehen kann, daß die verschobenen Streifen gegeneinander stoßen oder gar sich kreuzen, was dem Bilde des indirekten Sehens zu sehr widersprechen würde.

Die Heringschen Beispiele, Fig. 30, bieten dieselben Verhältnisse nur in weniger auffallendem Grade. Die Täuschung wird bei ihnen verstärkt durch Bewegungen des Blicks zwischen oben und unten, geschwächt durch solche von rechts nach links.*

Es kann vielleicht auffallen, daß ich zweierlei anscheinend so verschiedene Ursachen zur Erzeugung derselben Täuschungen zusammenwirken lasse. Wenn man sich aber erinnert, daß nach der hier vorgetragenen Ansicht die Kenntnis der Ausmessungen des Sehfeldes im indirekten Sehen auf Erinnerung an frühere bei Bewegungen gemachte Erfahrungen beruht, während bei bewegtem Blick neue ähnliche Eindrücke hinzukommen, so ergibt sich, daß die beiden Ursachen nicht so verschieden sind, wie sie in der Auseinandersetzung zu sein scheinen; sie sind nur unterschieden wie Erinnerung und gegenwärtige Anschauung analoger Verhältnisse.

Es kommt durch diese Verhältnisse eine Art Kontrast für die Richtungen von Linien und für die Entfernungen zustande von ähnlicher Wirkung, wie wir ihn im 24. Paragraphen für die Lichtstärken und Farben kennen gelernt haben. Die Unterschiede nahe gleicher Richtungen erscheinen vergrößert; dadurch daß wir eine Linie von einer oder vielen anderen geneigten Linien schneiden lassen,

* Über die Bedeutung der Augenbewegungen für die Auffassung räumlicher Verhältnisse vgl. die ausführlichere Besprechung dieses Gegenstandes in der Anm. 1 zu § 29. K.

wird sie scheinbar nach der entgegengesetzten Seite geneigt als jene. Die Erscheinungen des Kontrastes der Lichtstärken und Farben ließen sich mit Hilfe der Hypothese von TH. YOUNG auf die Vergleichung verschieden starker, aber qualitativ gleicher Erregungen der Fasern zurückführen. Wollte man sich die Lokalzeichen der Netzhautfasern als Empfindungen von zwei irgendwelchen zwei Koordinatenrichtungen entsprechenden Qualitäten denken, deren Intensität sich kontinuierlich in der Fläche änderte, so würden die Kontraste der Richtungen gerade auf dieselben Eigentümlichkeiten der Unterscheidung der Empfindungsstärke zurückzuführen sein, wie die der Farben. Da es aber gelang, den Einfluß der Augenbewegungen auf direkt sichtbare Erscheinungen zurückzuführen, so können wir eine solche Hypothese vorläufig auf sich beruhen lassen. Übrigens hat auch ZOELLNER bei seiner Beschreibung der Täuschung an dem Muster der Fig. 31 dieselbe auf die Bewegungen des Auges zurückzuführen gesucht. Ganz unzulässig erscheint mir dagegen die von E. HERING gegebene Erklärung. Derselbe meint, daß wir die Entfernung zweier Punkte nach der geradlinigen Entfernung ihrer beiden Netzhautbilder beurteilen. Demgemäß werden nach ihm im allgemeinen kleine Entfernungen relativ größer gesehen als große ungeteilte, weil bei kleinen Bögen der Unterschied zwischen dem Bogen und der Sehne, welche die Distanz seiner Enden mißt, relativ kleiner ist, als bei großen. Eben deshalb sollen kleine Winkel stets relativ zu groß im Vergleich zu ihren größeren Nebenwinkeln gesehen werden. Auf dasselbe Prinzip hat auch A. KUNDT eine ausführlichere Theorie dieser Erscheinungen zu gründen gesucht und Messungen in der schon oben erwähnten Weise ausgeführt, die sie stützen sollen[1], indem er ungeteilte Linien nach dem Augenmaß geteilten Linien gleich zu machen suchte. Für eine gewisse Länge der Linien stimmen auch Beobachtung und Berechnung ziemlich gut überein, aber bei kleineren Linien ist die Differenz fast doppelt so groß, als sie nach dem aufgestellten Erklärungsprinzip sein sollte. Herr KUNDT findet nämlich

Gesichtswinkel für die zu vergleichenden Distanzen		Fehler	
		beobachtet	berechnet
II	20° 14′	4,40	4,62
I	19° 41′	3,31	4,47
III	12° 47′	1,48	0,84

Ich muß hinzufügen, daß die Täuschungen auch bei viel kleineren Figuren bestehen bleiben, bis die Objekte sich der Grenze des deutlichen Sehens nähern, und daß bei so kleinen Objekten ein Unterschied zwischen dem Bogen und der Sehne nicht mehr merklich sein kann. KUNDT selbst hat gefunden, daß zum Beispiel seine Fig. 4 bis auf 9 Fuß Entfernung die Täuschung zeigte, wobei zwischen den betreffenden Bögen und Winkeln selbst in der 5. Dezimale noch kein Unterschied vorhanden ist.

Ich halte deshalb das von HERING und KUNDT gebrauchte Erklärungsprinzip nicht einmal für einen richtigen Ausdruck der Tatsachen. Wollte man es gar als Erklärung der wirklichen Ursache der Erscheinungen auffassen, so müßte man die Annahmen der nativistischen Theorie dahin ausdehnen, daß uns eine Kenntnis unserer Netzhaut, und zwar nicht nur der räumlichen Anordnung der empfindenden Punkte auf ihr, sondern sogar ihrer Krümmung angeboren sei.

---

[1] POGGENDORFFS Annalen. CXX. 1863. 118—158.

Zu erwähnen ist endlich noch, daß in einer Reihe von Fällen die binokulare Körperanschauung störend auf die Vergleichung der Distanzen im Gesichtsfelde einwirkt. Es macht sich hierbei geltend, daß unser natürliches Sehen Sehen von Körpern ist, und daß alle unsere Übung darauf abzweckt, die Dimensionen und Lagen der gesehenen Körper richtig zu beurteilen. Ich kann mit großer Sicherheit erkennen, ob mein Zeigefinger dicker oder dünner ist, als eine an dem entgegengesetzten Ende des Zimmers befindliche Gasröhre, obgleich ein kolossaler Unterschied in der scheinbaren Größe beider Körper vorhanden ist. Dagegen bin ich sehr unsicher, ob mein Zeigefinger, wenn ich ihn in einer bestimmten Entfernung vom Auge halte, dieselbe scheinbare Größe hat, wie ein an der anderen Seite des Zimmers befindliches Buch, oder etwa wie der Mond, vorausgesetzt, daß ich die zu vergleichenden Objekte nicht im Gesichtsfelde nahe aneinander bringe. Ich finde vielmehr, daß ich eine sehr starke Neigung habe, den Gesichtswinkel, unter dem der Finger erscheint, für viel kleiner als den des Buches oder des Mondes zu halten, bis ich beide ganz nahe zusammenbringe oder sich im Gesichtsfelde decken lasse.*

Damit scheint es mir auch zusammenzuhängen, daß wir wie die Versuche von Kundt zeigen, wenn wir eine horizontale Linie zu halbieren suchen, für das rechte Auge deren rechte Hälfte, für das linke Auge die linke zu groß zu machen pflegen. Bei einer Linie von 100 mm Länge, aus 226 mm Entfernung gesehen, verlegte das linke Auge die Mitte im Durchschnitt von 40 Beobachtungen auf 50,33 mm vom linken Ende entfernt, das rechte Auge nur 49,845 mm von demselben entfernt. Diese Abweichungen der scheinbaren von der wahren Mitte, 0,33 und 0,155 mm betragend, sind übrigens viel kleiner als die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen vom Mittel, deren mittlerer Fehler 0,50 und 0,66 betrug, so daß eben nur in einer großen Zahl von Versuchen die genannte Abweichung sichtbar wird.

Diese Abweichung kann, wie mir scheint, dadurch veranlaßt sein, daß wir beim binokularen Betrachten einer halbierten Linie diese symmetrisch zum Kopfe vor die Mitte des Gesichts zu halten pflegen, und wir deshalb gewöhnt sind, die rechte Hälfte mit dem rechten Auge größer zu sehen, die linke mit dem linken.

Zum Schluß der Beschreibung des Sehfeldes ist noch über seine Grenzen und Lücken zu reden. Seine Ausdehnung umfaßt alle Punkte des uns umgebenden Raums, von denen durch die Pupille noch Licht eindringen und noch auf empfindende Teile der Netzhaut fallen kann. Ausgeschlossen vom Sehfelde sind diejenigen Teile des Raums, namentlich also die hinter uns liegenden, von denen niemals Licht auf dem normalen Wege unsere Netzhaut erreichen kann. Die Fläche unseres Sehfeldes entspricht also dem nach außen projizierten Bilde unserer Netzhaut und die Grenze des Sehfeldes der Grenze der Netzhaut. Wir sind uns dieser Begrenzung bewußt, wir wissen, daß wir von den hinter uns liegenden Objekten durch das Gesicht nichts wahrnehmen, und können bei einiger Aufmerksamkeit auf das Feld des indirekten Sehens angeben, welche Gegenstände an dem Rande des Sehfeldes noch erscheinen, welche nicht, so weit die große Undeutlichkeit des Sehens mit den äußersten Teilen der Netzhaut dies eben erlaubt. Dabei ist zu bemerken, daß in der Empfindung ein

* Über die Entstehung des absoluten Größeneindruckes und seine Beziehung zu Entfernung und Winkelgröße vgl. Anm. 9 zu § 30 sowie die Ausführungen im Anhangskapitel. K.

wesentlicher Unterschied ist zwischen dem Teile des (verlängert gedachten) Sehfeldes, der überhaupt niemals gesehen werden kann, und dem sichtbaren Teile desselben, wenn er wegen Lichtmangels zeitweilig nicht gesehen wird. Bei Abschluß alles äußeren Lichtes haben wir ein bestimmt begrenztes dunkles Feld vor unsern Augen; wir sind uns aber wohl bewußt, daß wir dabei den hinter uns gelegenen Raum nicht dunkel sehen, sondern daß wir ihn gar nicht sehen. Die Empfindung des Dunkels ist die Empfindung des Ruhezustandes oder, wenn man will, der Mangel von Empfindung in Teilen unseres Sehnervenapparates, die erregt werden könnten, wenn ein Reiz auf sie wirkte. Ihr entspricht in der Wahrnehmung die Vorstellung vor uns gelegener Teile des Raums, welche unserem Auge kein Licht zusenden, was also eine bestimmte, wenn auch negative Aussage über den objektiven Zustand dieser Teile des Raums enthält. Den nicht sichtbaren Teilen des Raums entspricht aber auch kein empfindendes Organ, welches den Zustand seiner eigenen Ruhe bemerken und unterscheiden könnte. In der Wahrnehmung wird über sie gar nichts ausgesagt, als daß wir nichts über sie wissen, weder ob sie hell, noch ob sie dunkel seien. Beides ist wohl zu unterscheiden.

Nun gibt es aber auch innerhalb der äußeren Begrenzungslinie unseres Sehfeldes eine Lücke, entsprechend der für Licht unempfindlichen Eintrittsstelle unseres Sehnerven, wo wir nichts sehen. Die Lage und Ausdehnung dieser Stelle ist im Anfange des 18. Paragraphen bestimmt worden; dort wurde auch erwiesen, daß sie wirklich unempfindlich für Licht sei. Wir haben jetzt zu untersuchen, wie uns die entsprechende Stelle des Sehfeldes erscheint.

Der gewöhnliche Fall ist, daß wir gar nicht imstande sind zu bemerken, daß eine Lücke im Sehfelde sei, oder unsere Aufmerksamkeit auf das, was in der Lücke erscheinen sollte, festzuheften. Dies ist nicht nur der Fall, wenn die Anschauung der Objekte, welche in die Lücke fallen, ergänzt wird durch die Wahrnehmungen des anderen offenen Auges, oder falls dies geschlossen ist, ergänzt wird durch Bewegungen des einen geöffneten Auges, wobei die Lücke ihren Platz im Gesichtsfelde stets wechselt und daher, was von den Objekten in dem einen Augenblicke nicht gesehen wird, im andern erkannt werden kann. Wir bemerken vielmehr auch bei festgeheftetem Blicke die Lücke nicht, wenn der der Lücke benachbarte Teil des Sehfeldes einen gleichmäßig erhellten und gefärbten Grund darstellt; es erscheint uns vielmehr dann dieser ganze Teil des Feldes ohne Unterbrechung von der Farbe des Grundes ausgefüllt. Was für nicht gesehene Objekte sich dabei in der Lücke des Sehfeldes wirklich befinden, ist natürlich ganz gleichgültig. Diese verschwinden eben, wie schon oben gezeigt worden ist. Es ist dabei zu bemerken, daß wir überhaupt das indirekte Sehen gewöhnlich nicht benutzen, um uns über die Form, Größe und Ordnung der in ihm gesehenen Gegenstände Auskunft zu verschaffen, sondern daß es hauptsächlich nur dazu dient, eine Art roher Skizze von der Umgebung des fixierten Punktes, auf den unsere Aufmerksamkeit gerichtet ist, zu geben und um unsere Aufmerksamkeit jeder etwa neu auftretenden oder ungewöhnlichen Erscheinung, die im seitlichen Teile des Sehfeldes zum Vorschein kommt, sogleich zuzulenken. Ein Teil des Sehfeldes nun, der wie der blinde Fleck niemals irgendwelche, also auch keine auffallende Erscheinung darbieten kann, wird daher unter gewöhnlichen Umständen niemals Gegenstand der Aufmerksamkeit. Ja ich habe gebildete und unterrichtete Leute, selbst Ärzte, gekannt, denen es nicht gelang, sich von dem Verschwinden kleiner Objekte an dieser

Stelle zu überzeugen. Wenn wir dann durch physiologisch optische Versuche uns üben, Gegenstände im indirekten Sehen zu erkennen, so sind es doch zunächst nur größere durch Helligkeit oder Färbung oder Bewegung von ihrer Umgebung abstechende Gegenstände, auf die wir unsere Aufmerksamkeit, ohne den Fixationspunkt zu ändern, lenken und deren Ordnung wir erkennen können. Aber unsere Aufmerksamkeit einer bestimmten, durch gar keinen sinnlichen Eindruck ausgezeichneten Stelle, wie es die Lücke des Sehfeldes ist, wenn sie auf gleichmäßig gefärbten Grund fällt, im indirekten Sehen zuzuwenden vermögen wir nicht.

Ich muß hierbei jedoch bemerken, daß ich in der letzten Zeit angefangen habe, beim Aufschlagen eines Auges gegen eine ausgedehnte weiße Fläche und bei kleinen Bewegungen des Auges oder bei eintretender Akkommodationsspannung den blinden Fleck als einen schattigen Fleck zu sehen, so daß, wenn ich mit der Spitze des Zeigefingers darauf hinweise, mir die Fingerspitze verschwindet. Es ist dies eine subjektive Erscheinung, welche mit den Bd. II, S. 10 beschriebenen Erscheinungen zusammenhängt, und bald wieder schwindet, wenn man das Auge unbewegt geöffnet hält. Das ist also nur eine scheinbare, nicht eine wirkliche Ausnahme von dem Gesagten, denn dabei ist das Sehfeld subjektiv nicht einförmig erregt, sondern die Nachbarschaft des blinden Flecks durch besondere Erscheinungen ausgezeichnet, welche die Aufmerksamkeit auf diese Stelle zu fixieren imstande sind. Dazwischen kommt es doch immer wieder vor, daß ich ein helles Feld ansehe, ohne im geringsten imstande zu sein, ohne vorgängigen Versuch zu sagen, wo der blinde Flek im Sehfelde liegt.

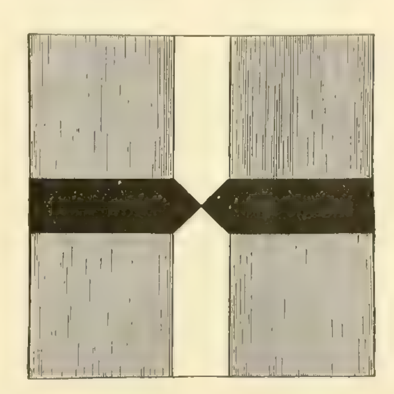


Fig. 35.

Anders verhält es sich, wenigstens für einen im indirekten Sehen etwas geübten Beobachter, wenn man Merkzeichen im Sehfelde anbringt, welche die Aufmerksamkeit gerade auf die Lücke hinzuleiten imstande sind. Dazu kann man z. B. sehr zweckmäßig ein Kreuz brauchen, dessen vertikaler Schenkel durch Farbe oder Helligkeit deutlich von dem horizontalen, beide ebenso vom Grunde unterschieden sind, und deren Kreuzungsstelle vom blinden Fleck ganz überdeckt werden kann. Fig. 35 stellt ein solches Kreuz dar. Die Marke *a* bezeichnet den Fixationspunkt. Die Zeichnung ist aus 16 cm Entfernung anzusehen. Um sich zu überzeugen, daß die Kreuzungsstelle ganz verschwindet, bedecke man sie mit einer farbigen Oblate, und wenn diese verschwunden ist, suche man bei gut fixiertem Blick zu ermitteln, ob der schwarze oder der weiße Schenkel des Keuzes im Fixationspunkte obenauf liegt. Volkmann[1] und die meisten anderen Beobachter, die diesen Versuch angestellt haben, glaubten bald den einen, bald den anderen Schenkel oben liegen zu sehen, öfter[2]

[1] Berichte der Kön. Sächs. Ges. d. Wissenschaften. 30. April 1853. S. 40.

[2] v. Wittich, Studien über den blinden Fleck, Archiv für Ophthalmologie 1863. IX, 3. S. 1—31.

den horizontalen, vielleicht weil der horizontale Durchmesser der Lücke geringer ist, als der vertikale. Macht man aber den horizontalen Schenkel kürzer und kürzer, so überwiegt schließlich die Farbe des vertikalen Schenkels. Ich habe selbst das früher auch so zu sehen geglaubt, seitdem ich aber durch vieles Beobachten eine größere Übung im indirekten Sehen erlangt habe, bin ich mir bei diesem Versuche ganz bestimmt bewußt, daß ich die Kreuzungsstelle nicht wahrnehmen kann. Auch AUBERT, der einer der geübtesten Beobachter im indirekten Sehen ist, stimmt damit überein. Er sagt: „Trotz vielfacher Übung im indirekten Sehen und vielfacher Wiederholung der von WEBER, VOLKMANN und neuerdings von WITTICH angegebenen Versuche muß ich schließlich offen bekennen, daß ich zu keinem Urteile darüber kommen kann, in welcher Weise das Gesichtsfeld in dieser Stelle ausgefüllt wird. Ob ein Kreuz, welches von einer gelben und blauen Linie gebildet wird, an der Kreuzungsstelle, wenn diese auf den blinden Fleck fällt, in der einen oder anderen Farbe erscheint, weiß ich trotz hundertfacher Wiederholung des Versuches nicht anzugeben, ebensowenig, ob zwei Parallellinien in der Mitte zusammenrücken oder nicht, oder ob eine Kreislinie, mag sie dick oder dünn sein, sich zum Kreise schließt oder nicht.“[1]

Schwieriger ist es, die Aufmerksamkeit auf die Lücke zu richten, wenn nur eine geradlinige Kontur ohne Unterbrechung durch die Lücke hinläuft. Man schiebe ein schwarzes Blatt Papier, was durch eine vertikale gerade Linie begrenzt ist, von der Schläfenseite des Sehfeldes her über ein weißes Blatt hin, auf welchem man einen Punkt mit einem Auge fixiert, bis ein Teil der Grenzlinie in die Lücke des Sehfeldes fällt. Die meisten Beobachter glauben in diesem Falle die gerade Begrenzungslinie ununterbrochen fortlaufend zu sehen; aber auch in diesem Falle habe ich mich neuerdings überzeugt, daß ich erkennen kann, wann und wo ich einen Teil der Linie nicht wahrnehme. Schiebe ich das schwarze Blatt vorwärts gegen den Fixationspunkt hin, so kann ich ganz genau den Augenblick erkennen, wo die beiden sichtbaren Enden der Begrenzungslinie zusammenschließen. Schwieriger ist es, deutlich zu erkennen, wann derselbe Moment beim Zurückziehen des schwarzen Blattes an der Schläfenseite des blinden Flecks eintritt, weil hier das indirekte Sehen schon viel unvollkommener ist. Wunderlich ist dabei, aber charakteristisch für das Wesen der Erscheinung, daß ich nirgends eine Lücke zwischen dem weißen und schwarzen Felde sehe, obgleich ich erkenne, daß ich an einer Stelle die Begrenzungslinie nicht sehen kann, daß sich zwischen das Schwarz und Weiße nichts einschiebt, und ich doch nicht angeben kann, wo und wie geformt die Grenze sei. Auch kann ich nicht sagen, daß Weiß und Schwarz dort verwaschen ineinander übergingen, denn das Grau dieses Übergangs wäre wieder etwas bestimmt Wahrnehmbares. Ich kann es nur vergleichen mit dem Eindruck, den man hat, wenn man im halben Dunkel lichtschwache Objekte zu fixieren und zu erkennen sucht und dann durch die Nachbilder einzelne Teile der Zeichnung ausgelöscht werden.

Sehr viel leichter, als bei einer geraden Linie, erkenne ich die Lücke, wenn sie auf einen Teil einer Kreislinie oder auf die Peripherie einer Kreisfläche fällt, dabei kann ich auch ziemlich gut angeben, wieviel von dem Kreise fehlt.

[1] AUBERT, Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 257—258.

Habe ich im Gesichtsfelde vor mir eine große Zahl verschiedenartiger kleiner Objekte, so bin ich imstande, die Stelle des blinden Flecks sogleich zu erkennen an einer gewissen Unklarheit und Undeutlichkeit, wodurch sie sich unterscheidet. Dies ist z. B. der Fall, wenn ich nach einem Gebüsch, einer gemusterten Tapete, einem mit Buchstaben bedruckten Blatte hinsehe.

Dem entsprechend muß ich behaupten, daß überhaupt keinerlei Empfindung dem blinden Flecke entspricht, und daß namentlich auch nicht etwa irgendwelche Empfindungen aus der Nachbarschaft sich auf die Lücke des Sehfeldes übertragen, sondern bei genauer Beobachtung und bei Anwendung der nötigen Hilfe, um die Aufmerksamkeit auf den blinden Fleck hinzulenken, kann man sich überzeugen, daß dort die Empfindung fehlt. Man sieht in der Lücke des Sehfeldes weder irgend etwas Helles oder Farbiges oder Dunkles, man sieht hier im strengen Sinne des Wortes nichts, und dieses Nichts kann sich nicht einmal als Lücke und Grenze des Sichtbaren geltend machen; denn wenn die Lücke des sichtbaren Sehfeldes selbst sichtbar sein sollte, so müßte sie in irgendeiner Qualität des Sichtbaren erscheinen, was sie nicht tut. Nur negativ können wir ihr Vorhandensein ermitteln dadurch, daß wir beobachten, welches die letzten Objekte sind, die wir noch sehen. Wenn wir dann ermitteln, daß diese im Raume nicht aneinander stoßen, so kommen wir zur Anerkennung der Lücke und ihrer räumlichen Lage und Größe. Da nun aber hierzu Lokalisierung der Gesichtseindrücke nötig ist, und diese nach unserer Auffassung erst durch Erfahrung erworben wird, so beruht dieses Auffinden der Lücke in der Tat auf einem Urteil; sie wird nicht unmittelbar empfunden.

Mit der größeren Lücke des Gesichtsfeldes hinter unserem Rücken verhält es sich übrigens ganz ähnlich, nur daß uns ihre Anwesenheit besser bekannt ist, als die des blinden Flecks, weil wir zu ihrer Ausfüllung zu keiner Zeit sinnliche Hilfsmittel gehabt haben, während die Lücke die blinden Flecks für gewöhnlich durch die Wahrnehmungen des anderen Auges und durch die Bewegungen des Blicks genügend ausgefüllt und daher nicht als Mangel fühlbar wird. Auch die Grenze des Sehfeldes können wir nur negativ bestimmen, indem wir im indirekten Sehen aufsuchen, welche Objekte noch sichtbar sind, welche nicht. Wenn wir dagegen einen einförmigen Grund herstellen, z. B. das Auge nach dem inneren Augenwinkel drehen und ein durchscheinendes beleuchtetes Blatt Papier vorhalten, wobei dann gegen den äußeren Augenwinkel hin nichts von den Teilen unseres Gesichts mehr sichtbar wird, sondern allein die weiße Fläche: dann ist es absolut unmöglich zu sagen, wo diese helle Fläche aufhört und wo das Nichtsehen anfängt. Wäre dagegen dort irgendein dunkler oder farbiger Fleck auf dem Papier, so würden wir sogleich die Richtung bestimmen können, in der wir diesen sehen. Auch hier also kann sich das nicht Sichtbare nicht als Grenze des Sichtbaren geltend machen und von ihm abheben.

Anders verhält es sich nun, wenn wir infolge unserer Empfindungen uns Vorstellungen von den Objekten bilden. Der objektive Raum und die darin enthaltenen Objekte können kein Loch haben entsprechend der Lücke unseres Sehfeldes. Wir befinden uns dann im wesentlichen in der Lage von jemandem, der ein beflecktes oder durchlöchertes Gemälde betrachtet und daraus sich eine Anschauung von dem zu bilden sucht, was der Maler hat vorstellen wollen. Wenn hierbei ein Fleck auf irgend einen der untergeordneten Teile des Gemäldes fällt und die Ergänzung selbstverständlich ist, so wird der Betrachtende

den Fleck vielleicht kaum beachten, oder wenigstens in seiner Vorstellung der Objekte durch ihn gar nicht gehindert werden und in dieser Beziehung den Fleck als nicht vorhanden betrachten können. Sollte der Fleck also auf eine einförmig gefärbte Fläche oder auf eine gleichmäßig gemusterte Fläche fallen, so wird der Beschauer ohne weiteres sich die Lücke in seiner Vorstellung mit der Farbe des Grundes ausfüllen, er müßte denn ganz besondere Gründe haben zu vermuten, daß dort die Färbung oder das Muster ursprünglich abweichend gewesen sei. Und ebenso wird er die Ergänzung ohne alles Zögern und Schwanken machen, wenn der Fleck einen kleinen Teil einer geradlinigen Kante oder einer Kreisperipherie verdeckt. Erst wenn der Fleck auf wichtige Punkte des Gemäldes oder solche, deren Bedeutung nicht so ganz selbstverständlich ist, fällt, wird er die Aufmerksamkeit des Beschauers anziehen und ihn in der Vollendung seines Anschauungsbildes von den dargestellten Gegenständen stören.

Dieser Vergleich kann das Verhältnis ungefähr klar machen; namentlich wenn man sich denkt, daß der Fleck bei einem reichen und interessanten Gemälde auf seitlich gelegene und ganz unwichtige Nebensachen des Gemäldes fällt und nicht durch seine Farbe oder Helligkeit imstande ist, die Aufmerksamkeit des Beobachters anzuziehen. Dann wird er möglicherweise ebenso unentdeckt bleiben, wie die Lücke im Sehfelde es gewöhnlich ist. Der Vergleich hinkt nur insofern, als der Fleck auf dem Gemälde etwas Sichtbares ist, auf welches die Aufmerksamkeit vollkommen leicht gefesselt werden kann, wenn sie einmal darauf hingelenkt war, während die Lücke des Gesichtsfeldes nicht die Qualität von etwas Sichtbarem hat und es ganz gegen unsere Gewöhnung und Übung ist, die Aufmerksamkeit im Felde des indirekten Sehens anders als auf einzelne positiv auffallende Phänomene zu richten. In beiden Fällen bilden wir uns aus den vorhandenen positiven Momenten der Empfindung unsere Vorstellung von den Objekten aus, so gut es eben geht; nur daß wir bei der Lücke des Sehfeldes sehr viel schwerer auf den Mangel des Anschauungsmaterials aufmerksam werden, als bei dem Fleck des Gemäldes. Volkmann sagt daher in dieser Beziehung mit Recht, daß man die Lücke im Sehfelde durch einen Akt der Einbildungskraft ausfüllt; nur muß man hinzufügen, daß diesem Akte der Einbildungskraft nicht die volle Evidenz der sinnlichen Anschauung zukommt, wenn auch in diesem Falle allerdings schwerer als in anderen ähnlichen Fällen zu ermitteln ist, daß ein Mangel des sinnlichen Materials stattfindet. Eines der hübschesten Beispiele, was Volkmann für diese Ergänzung durch die Einbildungskraft anführt, ist, daß wenn man die Lücke auf die bedruckte Seite eines Buches fallen läßt, man sie mit Druckschrift ausgefüllt zu sehen glaubt, welche man freilich nicht lesen kann. Aber allerdings ist diese Ausfüllung nur so lange scheinbar vorhanden, bis man sich durch genauere Aufmerksamkeit überzeugt, daß man an der betreffenden Stelle gar nichts wahrnimmt. Die Tätigkeit der Einbildungskraft geht also keineswegs so weit, daß dadurch die fehlende sinnliche Empfindung ersetzt und vorgespiegelt würde.

Es ist nun noch zu untersuchen, wie die räumlichen Abmessungen durch das Augenmaß für die Punkte nahe der Lücke ausfallen. In dieser Beziehung fallen die Aussagen verschiedener Beobachter sehr verschieden aus. Einige, wie namentlich v. Wittich, sehen die der Lücke nächstgelegenen Objekte gegen die Lücke hingezogen und diese dadurch ausgefüllt, andere, wie E. H. Weber, Volk-

MANN, ich selbst, sehen die umgebenden Teile in ihrer richtigen Lagerung, abgesehen von den Verziehungen, welche die seitlichen Teile des Gesichtsfeldes überhaupt erleiden. Bei wieder anderen, wie bei FUNKE, wechselt es, so daß sie unter etwas veränderten Umständen bald das eine sehen, bald das andere.

Die Unterschiede zeigen sich namentlich deutlich bei folgendem von VOLKMANN erfundenen Versuche: Man setze neun Buchstaben, so wie *A* bis *I* in Fig. 36, und fixiere mit dem rechten Auge aus einem Abstande von 20 cm das Kreuzchen bei *k*, so wird *E* in die Lücke fallen. Die Größe der Lücke ist für mein Auge unter diesen Umständen durch den gestrichelten Kreis angegeben, in dessen Mitte *E* steht. Dadurch, daß man eine kleine rote Oblate auf *E* legt und diese nach allen Seiten hin so weit vorschiebt, daß sie eben anfängt sichtbar zu werden, kann man kontrollieren, wie groß die Lücke ist und ob auch keiner der anderen Buchstaben dadurch verdeckt wird. Sehr gut läßt sich ein entsprechendes Muster auch herstellen mittels verschiedenfarbiger Oblaten, welche man an Stelle der Buchstaben hinlegt. An einem Muster, wie Fig. 36, sehen VOLKMANN und ich selbst die neun Buchstaben *ABCDFGHI* als Seiten eines Quadrats, in geraden Linien stehend, wie sie wirklich stehen, und die Mitte desselben leer. WITTICH dagegen sieht statt der geraden Seiten des Quadrats vier gegen die Mitte konvexe Bögen *ABC*, *CFI*, *IHG*, *GDA*. FUNKE[1] sieht sie konvex wie WITTICH, wenn keine anderen geraden Linien in der Nähe sind, mit denen er ihre Form vergleichen kann, dagegen gerade gestreckt, wie VOLKMANN, wenn durch *k* oder zwischen *k* und *ADG* eine vertikale gerade Linie gezogen wird, oder auch, wenn die Reihe *CFI* durch ein weißes Papier verdeckt wird.

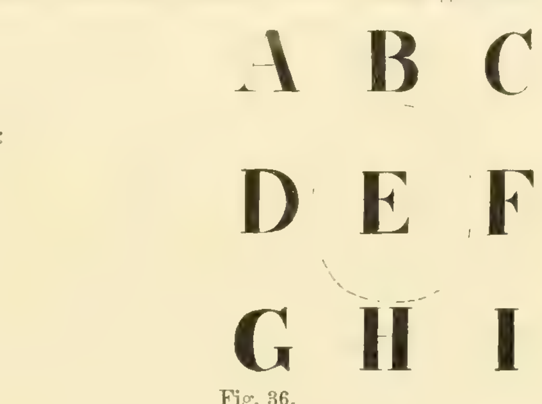


Fig. 36.

Eine gerade Linie, deren Mitte in die Lücke fällt, erscheint v. WITTICH verkürzt, während E. H. WEBER, VOLKMANN und ich sie unverkürzt sehen. Eine Kreisfläche, die nicht ganz, aber beinahe ganz vom blinden Flecke gedeckt wird, deren Rand man aber ringsum sehen kann, erscheint mir ebenso groß, wie eine ebenso weit nach der Nasenseite des Fixationspunktes liegende ähnliche Fläche. Übrigens glaube ich, wie schon WEBER und VOLKMANN fanden, die ganze Fläche in der Farbe des Randes zu sehen, selbst wenn von diesem nur ein schmaler Streif außerhalb der Lücke liegt. Ja, wenn die Kreisscheibe von engbedrucktem Papier geschnitten ist, so glaube ich sie in ganzer Ausdehnung mit Buchstaben bedeckt zu sehen, bis ich die Aufmerksamkeit genau auf sie richte, wo ich dann erkenne, daß ich in ihrer Mitte nichts unterscheide.

FUNKE berichtet, daß wenn die Lücke auf bedrucktes Papier fällt und er sich diesseits und jenseits derselben zwei hervorstechende Buchstaben gemerkt hat, diese einander genähert erscheinen. Auch in diesem Falle sehe ich die Buchstaben in ihrer richtigen Distanz.

[1] Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br. Bd. III. Heft 3. S. 12 u. 13.

Diese Widersprüche lassen sich wohl daraus erklären, daß wir als Ergänzung für die Beurteilung der räumlichen Dimensionen des Sehfeldes, welche hauptsächlich durch die Bewegungen des Auges erlernt ist, auch noch die WEBERschen Empfindungskreise berücksichtigen, namentlich für kleine, einander nahe Objekte, für welche die erstere Art der Beurteilung vielleicht unvollkommenere Data gibt. Ob zwei seitlich liegende schwarze Punkte, die auf verschiedenen Seiten des Fixationspunktes sich befinden, von ihm gleichweit abstehen oder nicht, können wir nicht mit derselben Genauigkeit entscheiden, als wenn beide auf derselben Seite und nahe aneinander liegen und zwischen ihnen noch ein weißer Fleck des Grundes sichtbar ist, dann ist es nicht zweifelhaft, welcher dem Fixationspunkt näher ist, welcher ferner.

Nun stimmen in den übrigen Teilen des Sehfeldes beiderlei Bestimmungsweisen notwendig überein; in der Gegend des blinden Flecks dagegen fehlen die Eindrücke, welche wir zwischen denen des Randes der Lücke erwarten sollten und welche das sinnliche Zeichen ihrer räumlichen Trennung sein sollten. Andererseits können wir mittels der Bewegungen des Auges doch richtige Erfahrungen über die wirkliche Lage der Randpunkte der Lücke machen und sie als getrennt erkennen. Daher ist es möglich, daß verschiedene Beobachter, die bald mehr auf dieses, bald mehr auf jenes Moment zu achten gewohnt sind, verschieden urteilen, und daß selbst bei einem und demselben Beobachter nebensächliche Verhältnisse für das eine oder andere den Ausschlag geben.

Ich habe früher bemerkt, daß im allgemeinen die Lücke eines jeden Auges beim gewöhnlichen zweiäugigen Sehen ausgefüllt wird durch das, was das andere Auge an jener Stelle des Sehfeldes wahrnimmt. Diese Regel erleidet aber, wie VOLKMANN gezeigt hat, ebenfalls Ausnahmen. Bezeichnen wir den blinden Fleck des einen Auges mit a, die entsprechende Stelle des anderen Auges mit α, die Umgebung von a mit b, die von α mit β, die den beiden Stellen a und α entsprechende Stelle im Gesichtsfelde mit A, ihre Umgebung mit B, so lassen sich leicht folgende Versuche machen:

1. Wir sehen mit dem ersten Auge auf weißes Papier und schließen das andere Auge, so empfinden wir

   auf a: Nichts, auf b: Weiß
   auf α: Dunkel, auf β: Dunkel

   und meinen zu sehen

   auf A: Weiß, auf B: Weiß.

2. Wir sehen mit beiden Augen auf weißes Papier, halten aber vor das zweite ein blaues Glas; wir empfinden also

   auf a: Nichts, auf b: Weiß
   auf α: Blau, auf β: Blau

   und meinen zu sehen

   auf A: Blauweiß, auf B: Blauweiß.

3. Ähnlich fällt der Versuch aus, wenn wir mit beiden Augen durch verschiedenfarbige Gläser sehen, wobei ein ungleichförmiges und wechselndes Gemisch beider Farben im Sehfelde erscheint; auch dann zeichnet sich A von dem Rest des Feldes in keiner Weise aus.

In den bisherigen Fällen, wo die Stelle α ebenso beleuchtet war, wie β, glaubten wir die Lücke in der Farbe des Grundes zu sehen, wobei dann das sonderbare Resultat eintritt, daß die Stelle A des Sehfeldes, die in dem einen Auge gar keine Empfindung, im anderen die von Schwarz oder Blau hervorruft, uns weiß oder blauweiß erscheint.

4. Nun blicken wir nach einem schwarzen Blatte, auf dem ein weißer Kreis liegt, der der Lücke a entspricht. Wir empfinden

   auf a: Nichts, auf b: Schwarz
   auf α: Weiß, auf β: Schwarz.

   Wir sehen

   auf A: Weiß, auf B: Schwarz.

   Halten wir vor das zweite Auge ein blaues Glas, so tritt hierbei statt Weiß natürlich überall Blau ein.

5. Wir blicken nach einem weißen Felde, auf dem sich ein schwarzer Fleck, der Lücke a entsprechend, befindet. Wir empfinden

   auf a: Nichts, auf b: Weiß
   auf α: Schwarz, auf β: Weiß

und sehen

   auf A: Schwarz, auf B: Weiß.

6. Nachdem wir die Fixation des vorigen Versuchs eine Weile unverändert unterhalten haben, blicken wir auf einen anderen Punkt der weißen Fläche, dann erscheint ein helleres weißes Nachbild des schwarzen Flecks, welches ebenfalls dem Orte der Lücke entspricht. Also auch der schwache Unterschied zwischen dem etwas helleren Weiß des Nachbildes und dem etwas matteren des Grundes genügt, den Gesichtseindruck der Lücke zu bestimmen. Dadurch können nun auch scheinbare Widersprüche mit Versuch 3 eintreten.

7. Die Bedingungen des vorigen Versuchs werden dahin abgeändert, daß ich vor das Auge ab ein grünes Glas, vor $\alpha\beta$ ein rotes setze und erst so fixiere, daß der schwarze Fleck der Lücke a entspricht, dann sehe ich den Fleck schwarzgrün, fast als ob ich ihn durch das grüne Glas mit der Lücke a sähe. In Wahrheit aber ist das eine Kontrastfarbe im anderen Auge auf α gegen den roten Grund β. Wenn ich eine kleine Weile fixiert habe und dann eine andere Stelle des Papiers fixiere, so sehe ich die Stelle A des Gesichtsfeldes rein rot, scheinbar mit dem Auge $\alpha\beta$ allein. Aber in diesem Falle ist es hier das heller rote Nachbild des vorhergesehenen Schwarz, wodurch sich α vor β auszeichnet und daher den Eindruck bestimmt.

Aus diesen letzteren Versuchen scheint also hervorzugehen, daß der Eindruck auf α das Gesamtbild wenigstens dann bestimmt, wenn α von β durch Helligkeit und Farbe deutlich unterschieden ist. Doch ist auch in solchen Fällen α nicht allein bestimmend.

8. Ich blicke nach einem hellgrauen Papier, auf dem eine weiße Oblate liegt, der Lücke a entsprechend; vor das geschlossene Auge $\alpha\beta$ bringe ich ein rotes Glas und öffne es dann. Nun habe ich in der Empfindung

   auf a: Nichts, auf b: Grau
   auf α: Rot, auf β: Mattes Rot.

Ich meine zu sehen:

auf A: Rotweiß   auf B: Graurot.

Das Rot auf α, wenn das Auge ab geschlossen ist, ist entschieden gesättigter, als es in A ist, wenn ab geöffnet ist, trotzdem a keinen Eindruck empfängt. Das Entsprechende sieht man auch bei Anwendung andersfarbiger Gläser. Der Unterschied wurde noch deutlicher, wenn ich nahe neben die weiße Oblate eine rote legte, die durch das rote Glas gesehen ebenso aussah, wie die weiße. Die rote Oblate muß aber, bis das Auge hinter dem roten Glase geöffnet wird, verdeckt werden durch einen dem Grunde gleichfarbigen Schirm, damit sie kein Nachbild entwickelt, welches ihr Rot abschwächt und grau macht, wenn es zur Vergleichung kommt.

In diesem letzteren Falle ist es unverkennbar der Einfluß des grauen Grundes in b, der uns a weißlich sehen läßt. Es lassen sich alle diese Erscheinungen auf das Gesetz zurückführen, daß wir mit beiden Augen die der Lücke entsprechende Stelle A des Sehfeldes um so viel heller oder dunkler als den Grund B zu sehen glauben, wie wir in dem anderen Auge (α und β) sie wirklich heller oder dunkler sehen. Die gemeinsame Färbung des Sehfeldes α und β wird nicht übergetragen auf die Lücke des anderen Auges, wohl aber die Differenz zwischen α und β auch als für a und b bestehend angeschaut. Ähnliche Verhältnisse werden wir unten in der Lehre vom binokularen Kontraste wiederfinden.

Einigen Anstoß haben diejenigen subjektiven Erscheinungen erregt, welche gerade an der Eintrittsstelle des Sehnerven auftreten, wie die Lichtgarben bei schneller Bewegung des Auges und die hellen oder dunklen Kreisflächen bei elektrischer Durchströmung. Zu erklären sind sie nur, wenn man annimmt, daß dabei die den Sehnerven unmittelbar umgebenden Netzhautteile betroffen sind. Bei der elektrischen Durchströmung erklärt sich dies auch wohl einfach dadurch, daß die hinter der Sclerotica liegende schlecht leitende, sehnige Masse des Sehnerven die elektrische Durchströmung der unmittelbar davor liegenden Netzhautteile erschwert und diese deshalb gegen das übrige Gesichtsfeld kontrastieren. Aufsteigender Strom, der das Gesichtsfeld licht macht, läßt den schlecht leitenden Sehnerveneintritt dunkel erscheinen, absteigender, der das Feld dunkel und rötlichgelb macht, dagegen licht und blau.

Für die leuchtenden Garben bei schneller Bewegung des Auges kann man den Beweis für die Richtigkeit dieser Erklärung nicht führen, wohl aber für die entsprechenden dunklen Flecke, welche man sieht, wenn man die Augen stark seitwärts und gegen ein gleichmäßig erleuchtetes Feld wendet. Hat man die Augen nach links gewendet, so sieht man mit dem rechten Auge einen dunklen Fleck nach rechts hin im Gesichtsfelde, dessen rechter Rand sehr gut begrenzt ist, der linke, gegen die Mitte des Gesichtsfeldes gekehrte dagegen sehr unbestimmt. Hier ist auch die Lücke des Gesichtsfeldes; denn wenn man eine Bleistiftspitze vor dieses innere Ende des dunklen Flecks schiebt, verschwindet sie; nicht aber in dem übrigen Teile des dunklen Flecks.

Dagegen sieht man vor dem nach links gewendeten linken Auge den dunklen Fleck zwischen dem Fixationspunkte dieses Auges und dem blinden Flecke liegen. Bei nach links gewendeten Augen wird also die Netzhaut in beiden Augen an der linken Seite des Sehnerven (im Gesichtsfelde ist der dunkle

Fleck nach rechts gewendet) unempfindlicher gemacht. Dies ist die Seite, wo der Nervenstamm gegen die Sclerotica hingebogen wird, diese wahrscheinlich etwas einbiegt, und so die Netzhaut verzerrt. Für diese dunklen Flecke läßt sich also erweisen, daß sie nicht der eigentlichen Eintrittsstelle des Sehnerven entsprechen, sondern daneben liegen. Die lichten Erscheinungen im dunklen Felde werden hier wohl, ebenso wie bei den Druckbildern, dieselbe Stelle einnehmen; auch meine ich bei darauf besonders gerichteter Aufmerksamkeit erkannt zu haben, daß die Spitze der einen Garbe bis zum Fixationspunkte hinreicht, wie der eine dunkle Fleck. Hiernach sind die Bd. II, S. 9 und 10 gemachten Angaben über den Ort dieser Flecke zu verbessern.

Wenn man nach zwei ungleich weit entfernten Punkten des Gesichtsfeldes hinsieht, für welche das Auge also auch nicht gleichzeitig vollkommen akkommodiert sein kann, so sieht man wenigstens den einen derselben als Zerstreuungsbild. Der Strahlenkegel, welcher dieses Zerstreuungsbild bildet, wird abgegrenzt durch die Öffnung der Pupille, und es liegt derjenige Strahl in der Achse dieses Strahlenkegels, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen ist. Wenn also auf denselben Netzhautpunkt a die Mittelpunkte zweier Zerstreuungskreise ungleich weit entfernter Punkte zusammenfallen, oder ein punktförmiges Bild mit der Mitte des Zerstreuungsbildes des zweiten Punktes, so müssen diejenigen beiden Strahlen beider Objektpunkte, welche durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen sind, ganz zusammenfallen, oder derjenige Strahl, welcher durch beide Objektpunkte geht, muß nachher durch den Mittelpunkt der Pupille gehen.

Der Mittelpunkt der Pupille befindet sich nun im Innern des optischen Systems des Auges, vor ihm liegt die Hornhaut, hinter ihm die Kristallinse. Die Strahlen erleiden also eine Brechung, ehe sie zu diesem Punkte gelangen, und werden auch noch wieder von ihrem Wege abgelenkt, nachdem sie ihn verlassen haben.

Strahlen, welche von dem wirklichen Mittelpunkte der Pupille ausgehen, werden in der Hornhaut so gebrochen, daß sie nachher von dem Bilde des Mittelpunkts der Pupille, welches die Hornhaut entwirft, auszugehen scheinen werden. Umgekehrt Strahlen, welche außerhalb des Auges gegen das Bild des Mittelpunkts der Pupille konvergieren, werden durch den Mittelpunkt der Pupille selbst hindurchgehen.

Das Bild, welches bei der Brechung der Strahlen in der Hornhaut vom Mittelpunkte der Pupille entworfen wird, ist also derjenige Punkt, welchen wir den K r e u z u n g s p u n k t d e r V i s i e r l i n i e n genannt haben. Wenn zwei leuchtende Punkte vor dem Auge in einer durch diesen Punkt gehenden geraden Linie liegen, so fallen die Mittelpunkte ihrer Zerstreuungskreise auf der Netzhaut zusammen.

Für das schematische Auge, welches Bd. I, S. 127 berechnet ist, habe ich auch den Abstand des Kreuzungspunktes der Visierlinien von der Hornhaut in Millimetern berechnet:

	Fernsehend	Nahesehend
1. Abstand des Mittelpunkts der Pupille	3,6 mm	3,2 mm
2. Abstand des Kreuzungspunktes der Visierlinien von der Hornhaut	3,036	2,661
3. Abstand des Kreuzungspunktes von dem Mittelpunkte der Pupille	0,564	0,539

In anderer Weise bestimmt sich der Scheitelpunkt der Gesichtswinkel, wenn die Akkommodation des Auges fortdauernd den beobachteten Objekten angepaßt wird, weil nämlich bei der veränderten Akkommodation des Auges die Knotenpunkte selbst sich verrücken. Wir finden diesen Scheitelpunkt unter diesen Bedingungen in folgender Weise am einfachsten.

Setzen wir voraus, es sei der Punkt A, Fig. 37, der gesuchte Scheitelpunkt der Gesichtswinkel, DA und CA zwei durch ihn gezogene gerade Linien, welche gleiche Winkel mit der optischen Achse EA machen, und mit ihr in einer Ebene liegen. Es wird verlangt, daß Objekte wie die beiden Pfeile, wenn ihre Endpunkte in den Linien DA und CA liegen, gleich große Netzhautbilder FG geben, wenn das Auge für die Endpunkte der betreffenden Objekte richtig akkommodiert ist. Nun sei B_0 das Bild von A im fernsehenden Auge, B_1 dasselbe im nahesehenden Auge. Wenn wir die Linien DA und CA als Strahlen betrachten, so werden diese so gebrochen werden, daß sie im Glaskörper von B_0 oder B_1 aus divergieren, um beziehlich nach F und G zu gehen.

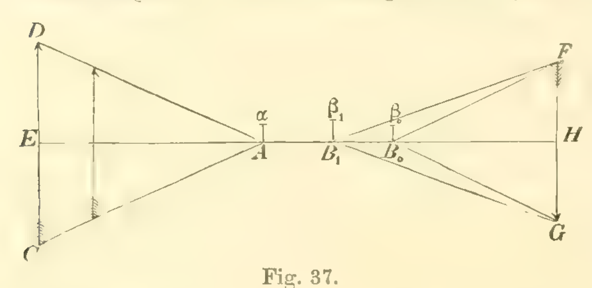


Fig. 37.

Nun denke man sich im Punkte A ein kleines, zur Achse senkrechtes Objekt α, und in B_0, beziehlich B_1 dessen optische Bilder β_0, beziehlich β_1, so findet nach Bd. I, S. 158, Gleichung 7d), folgende Beziehung zwischen den Winkeln DAC, FB_0G, FB_1G und diesen Bildern statt

$$n_1 \alpha \operatorname{tang} \frac{DAC}{2} = n_2 \beta_0 \operatorname{tang} \frac{FB_0G}{2}$$

$$= n_2 \beta_1 \operatorname{tang} \frac{FB_1G}{2} \cdot$$

wo n_1 und n_2 die Brechungsverhältnisse von Luft- und Glaskörper sind. Da nun

$$\operatorname{tang} \frac{FB_0G}{2} = \frac{FH}{HB_0}$$

$$\operatorname{tang} \frac{FB_1G}{2} = \frac{FH}{HB_1},$$

so folgt

$$\beta_0 : \beta_1 = HB_0 : HB_1 .$$

Der gesuchte Scheitelpunkt der Gesichtswinkel ist also durch die Eigenschaft charakterisiert, daß wenn in ihm ein kleines, zur Achse senkrechtes (virtuelles) Objekt liegt, dessen Bild bei den Veränderungen der Akkommodation seinem Abstande von der Netzhaut proportional wächst.

Wenn man für die mittleren Werte der optischen Konstanten des fernsehenden und nahesehenden Auges, welche Bd. I, S. 128 gegeben sind, die Lage dieses Punktes berechnet, so findet man seinen Abstand gleich 2,942 mm von der Hornhaut, so daß er fast genau zusammenfällt mit dem vorher berechneten Kreuzungspunkt der Visierlinien des fernsehenden Auges, dessen Abstand gleich 3,036 mm von der Hornhaut gefunden war. Bei den praktischen Anwendungen

können wir daher beide Punkte als zusammenfallend betrachten, besonders da so kleine Unterschiede, wie der hier gefundene, bei dem bisher erreichbaren Grade der Genauigkeit unserer Kenntnis der optischen Konstanten des Auges nicht zu verbürgen sind.

Für die Größe der Gesichtswinkel des unbewegten Auges würde es danach keinen Unterschied machen, ob wir seine Akkommodation den zu beobachtenden Punkten anpassen oder das Auge für unendliche Ferne einrichten.

J. B. Listing[1] hat den Unterschied des Winkels, den zwei von zwei Objektpunkten nach dem Knotenpunkte des Auges gezogene Linien bilden, von demjenigen, welchen die von denselben Objektpunkten nach dem Drehpunkte des Auges gezogenen Linien bilden, die Parallaxe zwischen der scheinbaren Lage der Objekte bei direktem und indirektem Sehen genannt. Ich würde es vorziehen, diesen Namen so anzuwenden, daß als Spitze des ersten Winkels der Kreuzungspunkt der Visierlinien[2] gebraucht würde, weil zwei punktförmige Objekte im indirekten Sehen gleiche Lage haben, wenn sie in derselben Visierlinie liegen.

Diese Parallaxe ist gleich Null, wenn die Objekte unendlich entfernt sind; weil für unendlich weit entfernte Objekte die Schenkel der beiden zu vergleichenden Winkel einander paarweise parallel werden. Ist nur das eine Objekt unendlich entfernt, so bezeichnet die genannte Parallaxe, um wieviel sich scheinbar das nähere Objekt vor einem unendlich entfernten Hintergrunde verschiebt, wenn man den Blick auf dasselbe hinrichtet.

Um für diesen verhältnismäßig einfachsten Fall die Größe der genannten Parallaxe vergleichen zu können mit den Ungenauigkeiten der Akkommodation, sei in Fig. 38 o der Drehpunkt des Auges, $oc = oe = \sigma$ die Entfernung des Kreuzungspunktes der Visierlinien. In der Richtung oa liege das fernere Objekt, b sei das nähere, so wird b, wenn es direkt fixiert wird, in der Richtung bg erscheinen und die in dieser Richtung liegenden Teile des unendlich entfernten Hintergrundes decken. Wenn aber in der Richtung oa fixiert wird, wird der Kreuzungspunkt der Visierlinien in e liegen und b in der Richtung ef erscheinen. Der Winkel $ebc = fbg = \varepsilon$ ist also die Parallaxe zwischen direktem und indirektem Sehen. Bezeichnen wir den Abstand des Punktes b vom Punkte c mit ϱ, so ist

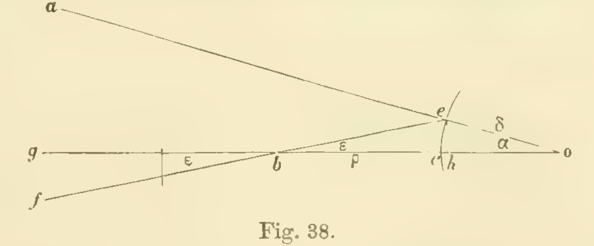


Fig. 38.

$$\operatorname{tang} \varepsilon = \frac{eh}{hb} = \frac{\sigma \sin \alpha}{\varrho + \sigma(1 - \cos \alpha)}.$$

Der Durchmesser p des Zerstreuungskreises von b in einem für unendliche Ferne akkommodierten Auge ist nach Bd. I, S. 110, Gleichung 1b), wenn P der Durchmesser der durch die Kristallinse gesehenen Pupille und H der Abstand des vorderen Brennpunktes vom Kreuzungspunkte der Visierlinien ist

[1] Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845. S. 14—16.

[2] Bei Listing sind Visierlinien die vom Objekte nach dem Drehpunkt des Auges gezogenen Linien.

$$p = \frac{P \cdot H}{\varrho}$$

und wenn η der Winkel ist, unter dem der Radius des Zerstreuungskreises auf den unendlich entfernten Hintergrund entworfen erscheint, f aber der Abstand des Knotenpunktes der Hornhaut vom hintern Brennpunkte, so ist

$$\operatorname{tang} \eta = \frac{p}{2f} = \frac{P \cdot H}{2\varrho \cdot f}$$

und wenn wir in dem Werte von $\operatorname{tang} \varepsilon$ die Größe σ (10,5 mm) gegen ϱ (die Entfernung des Objektes) vernachlässigen, so ist

$$\operatorname{tang} \varepsilon = \frac{\sigma \sin \alpha}{\varrho}$$

und daher $\eta > \varepsilon$, solange

$$\frac{PH}{2\sigma f} > \sin \alpha .$$

Es ist aber nach den früher gegebenen Werten für das fernsehende Auge

$$H = 15{,}869 \text{ mm},$$
$$f = 15{,}007 \text{ „}$$
$$\sigma = 10{,}521 \text{ „}$$

P kann schwanken zwischen etwa 3 und 6 mm; dem ersteren Werte entspricht

$$\alpha < 8{,}40^0, \quad \text{dem zweiten } \alpha < 17{,}33^0.$$

Solange die Bewegung des Auges nicht größer ist, als diese Werte des Winkels α, so lange ist die Verschiebung beim Übergang vom indirekten zum direkten Sehen nicht größer als der Radius des Zerstreuungskreises, unter dem der nähere Punkt erscheint.

Wenn man dabei berücksichtigt, wie außerordentlich undeutlich das indirekte Sehen in 8° Entfernung vom Blickpunkte ist, so wird dadurch begreiflich, daß wir nur ausnahmsweise, wenn irgend ein sehr heller Punkt hinter dem Rande eines dunklen Schirms auftaucht, die Veränderung des Bildes, welche von den Bewegungen des Auges abhängt, bemerken.

Ich lasse hier noch zwei wichtige Aktenstücke für die Lehre von dem Verständnis der Gesichtserscheinungen folgen, welche die Beobachtungen von Cheselden und Wardrop an zwei Blindgeborenen berichten, denen erst in späterem Alter das Gesicht durch eine Operation wiedergegeben wurde. Cheselden operierte einen Knaben von 13 Jahren, welcher mit sehr stark getrübten Kristallinsen (grauem Staar) geboren war.

Cheselden[1] berichtet folgendes über seine Fähigkeit, Formen zu unterscheiden: „Anfangs, nachdem er sein Gesicht bekommen hatte, wußte er so wenig über Entfernungen zu urteilen, daß er sich vielmehr einbildete, alle Sachen, die er sähe, berührten seine Augen, wie das, was er fühlte, seine Haut. Keine Sachen waren ihm so angenehm, als glatte und regelmäßige (vielleicht wegen des einfacheren und leichter zu analysierenden Gesichtseindrucks, oder wegen des Glanzes?), ob er wohl von ihrer Gestalt nicht urteilen oder erraten

[1] *Phil. Transact.* XXXV. 1728. p. 447; Smith, *Opticks Remarks.* p. 27.

konnte, was ihm an einer Sache gefiele. Er machte sich keinen Begriff von der Gestalt irgend einer Sache, unterschied auch keine Sache von der anderen, so verschieden sie auch an Gestalt und Größe waren; wenn man ihm aber sagte, was das für Dinge wären, die er zuvor durchs Gefühl erkannt hatte, so betrachtete er sie sehr aufmerksam, um sie wieder zu kennen; weil er aber auf einmal zu viel Sachen zu lernen hatte, vergaß er immer wieder viel davon und lernte, wie er sagte, in einem Tage tausend Dinge kennen und vergaß sie wieder. Zum Exempel, er hatte oft vergessen, welches die Katze und welches der Hund war, und schämte sich darum weiter zu fragen; fing also die Katze, die er durch das Gefühl kannte, betrachtete sie sehr genau, setzte sie nieder und sagte: „So, Miezchen, nun will ich dich ein andermal kennen." — Man glaubte, er würde bald verstehen lernen, was Gemälde vorstellten, es zeigte sich aber das Gegenteil. Denn zwei Monate, nachdem ihm der Staar gestochen war, machte er plötzlich die Entdeckung, daß sie Körper mit Erhöhungen und Vertiefungen darstellten; bis dahin hatte er sie nur als buntscheckige Flächen angesehen. Dabei aber erstaunte er nicht wenig, daß sich die Gemälde nicht so anfühlen ließen, wie die Dinge, welche sie vorstellten, und daß die Teile, welche durch ihr Licht und Schatten rund und uneben aussahen, flach, wie die übrigen, anzufühlen waren. Er fragte, welcher von seinen Sinnen ihn betröge, das Gefühl oder das Gesicht. Als man ihm seines Vaters Bild in einem Angehänge an seiner Mutter Uhr zeigte und ihm sagte, was es wäre, erkannte er es für ähnlich, wunderte sich aber sehr, daß ein großes Gesicht sich in einem so kleinen Raume vorstellen ließ, welches ihm, wie er sagte, so unmöglich würde geschienen haben, als einen Scheffel in eine Metze zu bringen.

„Anfangs konnte er wenig Licht vertragen und hielt alles, was er sah, für ungemein groß; als er aber größere Sachen sah, hielt er jene für kleiner, weil er sich gar keine Linien außerhalb des Umfangs, den er sah, vorstellen konnte. Daß das Zimmer, worin er wäre, ein Teil des Hauses sei, sagte er, wüßte er wohl, könnte aber nicht begreifen, wie das ganze Haus größer als das Zimmer aussehen könnte."

„Ein Jahr, nachdem er sein Gesicht wiedererhalten hatte, brachte man ihn auf die Dünen von Epsom, wo er eine weite Aussicht hatte; diese ergötzte ihn gar sehr und war ihm, wie er sagte, eine neue Art von Sehen."

„Als ihm der Staar an dem anderen Auge gestochen ward, kamen ihm, wie er sagte, die Sachen mit diesem Auge größer vor, doch nicht so groß, als sie ihm anfangs mit dem ersten erschienen waren. Wenn er einerlei Sache mit beiden Augen ansah, so kam sie ihm noch einmal so groß vor, als mit dem zuerst erhaltenen allein; aber doppelt sah er nichts, soviel man entdecken konnte."

Hierbei ist zu bemerken, daß auch bei einer noch so undurchsichtigen Linse der Blinde immer imstande war zu lernen, wie er die Augen bewegen mußte, um von der Sonne den hellsten Eindruck zu empfangen, d. h. nach der Sonne hinzusehen. Also in der Beurteilung der Richtung der Objekte aus der Richtung des Blicks nach ihnen hin konnte er nicht als ganz ungeübt betrachtet werden. Ja, es ist selbst unwahrscheinlich, daß die Linse jemals das Licht so vollständig gleichmäßig nach allen Richtungen hin verstreue, daß nicht doch am Ende die Teile der Netzhaut, welche dem Orte, wo der Focus der Strahlen sich bilden sollte, benachbart waren, etwas stärker erleuchtet gewesen wären, als die übrige Fläche der Netzhaut. Dann konnte auch selbst ein gewisser,

wenn auch sehr unvollkommener und ungenauer Grad der Lokalisierung im Sehfelde ausgebildet sein, wie auch J. Ware[1] bei einem ähnlichen Falle bemerkte. Letzterer fand, daß Kinder mit Katarakt nicht nur die Farben gefärbter Gegenstände, die man dem Auge nahe brachte, noch erkennen konnten, sondern sogar einigermaßen die Entfernung. Ein siebenjähriger Knabe, der von Ware operiert war, war von Anfang an viel geschickter und sicherer als Cheseldens Patient. Es ist sehr interessant, daß in dem beschriebenen Falle dennoch das Erlernen der Gesichtswahrnehmungen so deutlich hervortritt.

Noch merkwürdiger in mancher Beziehung ist ein von Wardrop[2] mitgeteilter Fall von einer Dame, welche blind, wahrscheinlich mit getrübten Linsen geboren war. Im Alter von sechs Monaten wurde sie in Paris einer Operation unterworfen, nach welcher das rechte Auge ganz zugrunde ging, im anderen die Pupille vollständig verwuchs, so daß keine Spur derselben mehr zu sehen war, außer einigen Streifen von gelben Ausschwitzungen, die in unregelmäßiger Weise über die Mitte der Iris verbreitet waren. Sie war demnach viel blinder, als Staarkranke zu sein pflegen, und konnte wohl kaum mehr vom Licht und seiner Richtung erkennen, als Gesunde hinter den geschlossenen Augenlidern erkennen können. Sie konnte ein sehr helles von einem dunklen Zimmer unterscheiden, ohne indessen die Richtung des Fensters erkennen zu können, durch welches das Licht drang; dagegen bei Sonnenschein und hellem Mondschein erkannte sie die Richtung, wo das Licht herkam.

Am 26. Januar 1826 wurde versucht, die Ausschwitzungen, die die Pupille verschlossen, zu durchschneiden, was nicht gelang. Am 8. Februar darauf wurde ein Schnitt durch die Iris gemacht, der reichlich Licht in das Auge treten ließ; hinter demselben lag aber noch eine undurchsichtige Masse. Während der mäßigen Entzündung, welche folgte, war die Patientin gegen Licht sehr empfindlich; man bemerkte, daß sie oft versuchte ihre Hände zu sehen. Am 17. Februar endlich wurde die Öffnung in der Iris erweitert und die opaken Massen hinter derselben entfernt, wodurch endlich das Sehen frei wurde. Ich lasse hier das Wesentliche von Wardrops Bericht folgen:

„Nach der Operation kehrte sie in einem Wagen nach Hause zurück, die Augen nur lose mit einem seidenen Tuch verbunden; das erste, was sie bemerkte, war ein Mietwagen, der vorbeikam, wobei sie ausrief: „Was für ein großes Ding ist da bei uns vorbeigekommen?“ Im Lauf des Abends bat sie ihren Bruder, ihr seine Uhr zu zeigen, in betreff deren sie viel Neugier bewies, und sie blickte nach ihr eine geraume Zeit, indem sie sie nahe an ihr Auge hielt. Man fragte, was sie sähe, und sie antwortete, daß eine Seite dunkel und die andere hell wäre; sie zeigte auch auf die Ziffer 12 und lächelte. Ihr Bruder fragte, ob sie noch etwas mehr sähe? sie antwortete „Ja“ und zeigte auf die Ziffer 6 und auf die Zeiger der Uhr. Dann betrachtete sie die Kette und die Siegel, und bemerkte, daß eines der Siegel hell sei, was in der Tat sich so verhielt, da es aus Bergkristall war. Am anderen Tage bat sie Herr Wardrop wieder nach der Uhr zu sehen, was sie verweigerte, indem sie sagte, daß das Licht ihrem Auge wehe täte und daß sie sich äußerst dumm vorkäme, indem sie damit meinte, sie sei zu sehr verwirrt durch die sichtbare Welt, die

[1] J. Ware, *Case of a young gentleman who recovered his sight, when seven years of age. Phil. Trans.* XCI. 1801. p. 382—396.

[2] J. Wardrop, *Case of a lady born blind, who received sight at an advanced age by the formation of an artificial pupil. Phil. Trans.* III. 1826. p. 529—540.

ihr so zum ersten Male eröffnet war. Am dritten Tage bemerkte sie Türen an der anderen Seite der Straße und fragte ob sie rot seien; sie waren in der Tat von der Farbe des Eichenholzes. Am Abend blickte sie nach ihres Bruders Gesicht und sagte, sie sähe seine Nase; er forderte sie auf, danach zu greifen, was sie tat, dann warf er sich ein Taschentuch über das Gesicht und sagte, sie möchte noch einmal hinsehen, worauf sie es scherzend fortzog und fragte: „Was soll das heißen?“

Am sechsten Tage erklärte sie, daß sie besser sähe, als an irgend einem der vorigen Tage; „aber ich kann nicht sagen, was ich sehe, ich bin ganz dumm“. Sie schien in der Tat dadurch ganz verwirrt zu sein, daß sie nicht fähig war, die Wahrnehmungen durch den Tastsinn mit denen durch den Gesichtssinn zu kombinieren und fühlte sich enttäuscht, daß sie nicht fähig war, sogleich Gegenstände mit dem Auge zu unterscheiden, die sie so leicht durch Betasten unterscheiden konnte.

Am siebenten Tage bemerkte sie die Hauswirtin, bei der sie wohnte, und erklärte, daß sie schlank sei. Sie fragte, was die Farbe ihres Kleides sei? worauf man antwortete, es sei blau. „So ist auch das Ding auf Eurem Kopfe“, bemerkte sie, was richtig war; „und Euer Taschentuch ist von anderer Farbe“, was auch richtig war. Sie fügte hinzu: „Ich sehe Euch ziemlich gut, denke ich.“ Teetassen und Untertassen wurden einer Prüfung unterzogen: „Was ist dies?“ fragte ihr Bruder. „Ich weiß es nicht“, antwortete sie, „es sieht sehr verquer aus; aber ich kann im Augenblick sagen, was es ist, wenn ich es anfasse.“ Sie sah eine Orange über dem Kamin liegen, aber hatte keinen Begriff, was es wäre, bis sie sie berührte. Sie schien nun heiterer zu werden und größere Hoffnungen auf ihren Eintritt in die Welt des Sichtbaren zu hegen; auch meinte sie, daß sie ihre neu erworbenen Fähigkeiten würde besser gebrauchen können, wenn sie nach Haus zurückkäme, wo ihr alles genau bekannt war.

Am achten Tage fragte sie ihren Bruder bei Tische, was er sich da gerade nehme; und als ihr gesagt wurde, es sei ein Glas mit Portwein, antwortete sie: „Portwein ist dunkel und sieht sehr häßlich aus.“ Als Kerzen in das Zimmer gebracht wurden, bemerkte sie ihres Bruders Gesicht im Spiegel und auch das einer anwesenden Dame; sie ging auch zum ersten Male ohne Beistand von ihrem Stuhl zu einem Sopha und wieder zurück zu dem Stuhl. Beim Tee fiel ihr das Geschirr auf, sie bemerkte den Glanz des Porzellans und sie fragte: „was die Farbe längs der Kante sei“. Man sagte ihr, es sei Gelb, worauf sie erwiderte: „Die Farbe will ich wieder kennen.“

Am neunten Tage kam sie zum Frühstück herab in sehr guter Laune; sie sagte zu ihrem Bruder: „Heut sehe ich dich sehr gut“, kam zu ihm heran und reichte ihm die Hand. Sie bemerkte auch einen Mietzettel an dem Fenster eines Hauses auf der entgegengesetzten Seite der Straße, und ihr Bruder, um sich zu überzeugen, führte sie drei verschiedene Male an das Fenster, und zu seinem Erstaunen und Freude deutete sie jedesmal ganz bestimmt danach hin.

Sie brachte einen großen Teil des elften Tages damit zu, aus dem Fenster zu sehen, und sprach sehr wenig.

Am zwölften Tage wurde ihr der Rat gegeben auszugehen, worüber sie sehr vergnügt war. Ihr Bruder ging mit ihr, als ihr Führer, und nahm sie mit sich zweimal um die Säulenhallen von Coventgarden herum. Sie schien sehr erstaunt, aber offenbar erfreut zu sein; der klare blaue Himmel zog ihre

Aufmerksamkeit zuerst auf sich, und sie sagte: „Das ist das Hübscheste, was ich bisher gesehen habe, und immer gleich hübsch, so oft ich mich danach wende und hinsehe.“ Sie unterschied den Straßendamm vom Trottoir und trat von dem einen zum anderen herüber, wie jemand, der an den Gebrauch seiner Augen gewöhnt ist. Ihre große Neugier und die Art, wie sie die Menge von Gegenständen rings herum anstarrte und danach zeigte, erregte die Aufmerksamkeit der Vorübergehenden und ihr Bruder brachte sie bald nach Hause, sehr gegen ihren Willen.

Am dreizehnten Tage trug sich nichts Besonderes zu bis zur Teezeit, wo sie bemerkte, daß anderes Teegeschirr aufgesetzt war, welches nicht hübsch sei und einen dunklen Rand habe, was eine richtige Angabe war. Ihr Bruder forderte sie auf, in den Spiegel zu sehen und ihm zu sagen, ob sie sein Gesicht darin sähe; worauf sie, sichtbar enttäuscht, antwortete: „Ich sehe mein eignes; laß mich gehen.“

Am vierzehnten Tage fuhr sie in einem Wagen vier Meilen weit auf der Wandsworth-Straße, bewunderte meistens den Himmel und die Felder, bemerkte die Bäume und auch die Themse, als sie über Vauxhallbrücke kam. Es war heller Sonnenschein und sie sagte, daß etwas sie blende, wenn sie auf das Wasser sähe.

Am fünfzehnten Tage, einem Sonntage, ging sie nach einer Kapelle in einiger Entfernung: sie sah jetzt entschieden deutlicher als früher, aber erschien noch verwirrter als während der Zeit, wo ihr Gesicht weniger vollkommen war. Die Leute, welche auf dem Trottoir vorbeikamen, erschreckten sie; und einmal als ein Herr an ihr vorbeikam, der eine weiße Weste und einen blauen Rock mit gelben Knöpfen hatte, die im Sonnenschein stark erglänzten, schreckte sie so zusammen, daß sie ihren Bruder, der mit ihr ging, von dem Trottoir herabzog. Sie erkannte, daß der Geistliche seine Hände auf der Kanzel bewegte und daß er etwas darin hielt; es war ein weißes Taschentuch.

Am sechzehnten Tage fuhr sie aus, um eine Visite in einem entfernten Teile der Stadt zu machen; das Getreibe in den Straßen schien sie sehr zu unterhalten. Als sie gefragt wurde, wie sie an diesem Tage sähe, antwortete sie: „Ich sehe sehr viel, wenn ich nur sagen könnte, was ich sehe; aber sicherlich, ich bin sehr dumm.“

Nichts Besonderes fiel am siebzehnten Tage vor; und als ihr Bruder sie fragte, wie es ihr ginge, antwortete sie: „Es geht mir gut, und ich sehe immer besser; aber quält mich nicht mit vielen Fragen, bis ich etwas besser gelernt habe, meine Augen zu gebrauchen. Alles, was ich sagen kann, ist, daß ich versichert bin durch alles das, was ich sehe, welch eine große Veränderung mit mir vorgegangen ist; aber ich kann nicht beschreiben, was ich empfinde.“

Achtzehn Tage nach der Operation versuchte Herr Wardrop durch einige Proben die Genauigkeit ihrer Begriffe von der Farbe, Gestalt, Form, Lage, Bewegung, Entfernung der äußeren Objekte festzustellen. Da sie nur mit einem Auge sehen konnte, konnte nichts ermittelt werden über das Doppeltsehen mit zwei Augen. Sie erkannte offenbar die Verschiedenheit der Farben, das heißt sie erhielt und empfand verschiedene Eindrücke von verschiedenen Farben. Als ihr verschiedenfarbige Stücke Papier, $1^1/_2$ Zoll im Quadrat, vorgelegt wurden, unterschied sie sie nicht nur sogleich voneinander, sondern gab einigen Farben auch einen entschiedenen Vorzug; Gelb gefiel ihr am besten, und dann Rosa-

rot. Hierbei mag noch bemerkt werden, daß, wenn sie einen Gegenstand zu prüfen wünschte, es ihr ziemlich schwer wurde, ihr Auge dahin zu richten und seine Lage ausfindig zu machen, indem sie ihre Hand sowohl, wie ihr Auge in verschiedenen Richtungen herum bewegte, wie jemand mit verbundenen Augen oder im Dunkeln mit seinen Händen umhergreift, um zu fassen, was er wünscht. Sie unterschied auch große von kleinen Gegenständen, wenn beide ihr nebeneinander zum Vergleich vorgehalten wurden. Sie sagte, sie sähe verschiedene Formen an verschiedenen Gegenständen, die ihr gezeigt wurden. Man fragte, was sie meinte unter verschiedenen Formen, zum Beispiel langen, runden, viereckigen, und nachdem man sie gebeten hatte, mit ihrem Finger diese Formen auf ihrer anderen Hand zu zeichnen, brachte man vor ihr Auge die betreffenden Formen, wobei sie richtig nach ihnen hinwies. Sie unterschied nicht nur kleine von großen Gegenständen, sondern wußte auch was oben und unten sei. Um dies zu prüfen, wurde eine mit Tinte gezeichnete Figur vor ihr Auge gebracht, deren eines Ende breit, das andere schmal war; sie sah deren Lage, wie sie wirklich war, nicht umgekehrt. Sie konnte auch Bewegungen bemerken; denn als ein Glas Wasser auf den Tisch vor sie gestellt wurde und als sie ihre Hand näherte, schnell fortgezogen wurde in größere Entfernung, sagte sie sogleich: „Sie bewegen es; Sie nehmen es fort.“

Sie schien dagegen die größte Schwierigkeit zu haben in der Schätzung der Entfernung der Dinge; denn während ein Gegenstand dicht vor ihr Auge gehalten wurde, suchte sie wohl danach mit ausgestreckter Hand weit jenseits seiner wirklichen Lage, während sie bei anderen Gelegenheiten nahe an ihrem Gesicht herumgriff nach einem Dinge, was weit entfernt war.

Sie lernte mit Leichtigkeit die Namen der verschiedenen Farben, und zwei Tage, nachdem ihr die farbigen Papiere gezeigt waren, bemerkte sie beim Eintritt in ein karminrotes Zimmer, daß es rot sei. Sie bemerkte auch einige Gemälde, die an der roten Wand des Zimmers hingen, indem sie saß, wobei sie einige kleine Figuren auf ihnen unterschied, aber nicht wußte, was sie darstellten, und die vergoldeten Rahmen bewunderte.

Dabei mag noch bemerkt werden, daß sie durch die Übung ihres Gesichts nur sehr wenig Kenntnis irgendwelcher Formen gewonnen hatte und unfähig war, die Wahrnehmungen des neu gewonnenen Sinnes anzuwenden und zu vergleichen mit dem, was sie durch den Tastsinn zu erkennen gewöhnt war. Als man daher den Versuch machte, ihr einen silbernen Bleistifthalter und einen großen Schlüssel in die Hand zu geben, so unterschied sie und kannte beide ganz genau. Aber wenn sie nebeneinander auf den Tisch gelegt wurden, sah sie, daß beide verschieden seien, aber sie konnte nicht sagen, welches der Bleistifthalter sei und welches der Schlüssel.

Nichts weiter kam vor in der Geschichte dieser Dame, was der Erwähnung wert wäre, bis zum fünfundzwanzigsten Tage nach der Operation. An dem Tage fuhr sie in einem Wagen durch Regent's Park, und schien dort mehr als gewöhnlich sich zu unterhalten, und stellte mehr Fragen über die umgebenden Gegenstände, zum Beispiel: „Was ist das?“ Es ist ein Soldat, war die Antwort. „Und das, sieh! sieh!“ Es waren Kerzen von verschiedenen Farben in einem Ladenfenster. „Was ist das, das da vorbeikam?“ Es war ein Herr zu Pferde. „Aber was ist da Rotes auf dem Trottoir?“ Es waren ein Paar Damen, die rote Shawls trugen. Als sie in den Park kam, wurde sie gefragt,

was sie vorzugsweise sähe, oder ob sie erraten könnte, was einzelne von den Gegenständen wären. „O ja," antwortete sie, „da ist der Himmel, da ist Gras, dort ist Wasser und zwei weiße Dinge", welches zwei Schwäne waren. Als sie auf dem Rückweg durch Piccadilly kam, erstaunte sie sehr über die Juwelierläden und ihre Äußerungen erregten herzliches Lachen bei ihren Begleitern.

Von da bis zu der Zeit, wo sie London verließ, am 31. März, sechs Wochen nach der Operation, fuhr sie fort, fast täglich mehr Kenntnis der sichtbaren Welt zu gewinnen, aber es blieb noch viel zu lernen übrig. Sie hatte eine ziemlich genaue Kenntnis der Farben und ihrer verschiedenen Abstufungen und Namen gewonnen; und als sie Herrn Wardorp ihren Abschiedsbesuch machte, trug sie das erste Kleid, was sie sich selbst ausgewählt hatte, helles Purpurrot, was ihr sehr zu gefallen schien, ebenso wie ihr Hut, der mit roten Bändern geziert war. Sie hatte noch durchaus keine genaue Kenntnis der Entfernungen oder Formen gewonnen, und bis zu dieser Zeit hin war sie immer noch verwirrt bei jedem (neuen) Gegenstand, auf den sie blickte. Auch war sie noch nicht fähig, ohne beträchtliche Schwierigkeit und zahllose vergebliche Versuche, ihr Auge auf einen Gegenstand zu richten, so daß, wenn sie versuchte danach hinzublicken, sie ihren Kopf nach verschiedenen Seiten wendete, bis ihr Auge den Gegenstand erfaßte, nach dem sie suchte. Sie hegte indessen noch immer die Hoffnung, die sie kurz nach der Operation geäußert hatte, daß wenn sie nach Hause käme, ihre Kenntnis der Außendinge genauer und verständlicher werden würde, und daß, wenn sie blicken könnte auf die Sachen, mit denen ihr Tastsinn so lange vertraut gewesen war, die Verwirrung, welche die Mannigfaltigkeit der Gegenstände ihr bis jetzt verursacht hatte, schwinden würde."

So weit Wardorp. Es ist bei diesem Berichte zu bedenken, daß Patientin vor der letzten Operation schon mehrere Tage lang sich bemüht hat, bei freilich noch nicht vollständig wiedererlangtem Gesichtsvermögen, ihre Hände zu besehen, und daher wohl gelernt haben konnte, diese im Gesichtsfelde zu kennen und ihren Bewegungen mit dem Blicke zu folgen, wie sie denn auch selbst vorher schon gelernt haben konnte, ihre Augen der Sonne zuzuwenden, also einen gewissen Grad der Richtung des Blicks und die Kenntnis der ohngefähren Richtung, aus der das ihre Augen erregende Licht herkam, erhalten haben mochte. Die optischen Bilder in ihrem Auge müssen ziemlich gut gewesen sein, da sie die Ziffern und Zeiger einer Taschenuhr, einen Mietzettel an einem gegenüberliegenden Fenster, Wachskerzen, Juwelenschmuck am Schaufenster von der Mitte der Straße her aus dem Wagen erkennen konnte. Das erste, was sie als Gegenstände unterscheiden lernte, waren bewegliche Dinge, namentlich menschliche Gestalten und durch Farbe hervorstechende Objekte, wie die rötlichen Türen, die Orange, die farbigen Kleider der Frauen. Es ist übrigens auch bei den neugeborenen Kindern auffallend, wie viel früher sie menschliche Gestalten und Gesichter zu erkennen und mit dem Blicke zu verfolgen wissen, als andere Gegenstände. Die menschlichen Gestalten ziehen natürlich vor anderen Dingen das Interesse auf sich und sind durch die Art der Bewegungen, die sie ausführen, von anderen Objekten des Gesichtsfeldes wesentlich unterschieden. Bei diesen Bewegungen sind sie auch als zusammenhängendes Ganzes charakterisiert, und das Gesicht, als ein weißrötlicher Fleck mit den beiden glänzenden Augen ist immerhin eine Stelle dieses Bildes,

welche leicht wiederzuerkennen sein wird, auch für jemanden, der sie erst wenige Male gesehen hat.

Was die Unterscheidung der Formen betrifft, auf die es uns hier hauptsächlich ankommen würde, so ist zunächst klar, daß in einem solchen Falle die Hauptschwierigkeit sein muß, die wechselnden perspektivischen Projektionen körperlicher Gegenstände kennen zu lernen. Denn der Blinde weiß natürlich gar nichts von der Möglichkeit einer solchen Projektion. Aber einzelne Züge in dem Bericht zeigen, daß die Dame auch solche Formen, die durch perspektivische Projektion nicht entstellt waren, nicht zu erkennen wußte, wie z. B. den Schlüssel und den Bleistifthalter. Esterer mit Bart und Ring, von der Fläche gesehen, mußte auf der Netzhaut sich in derselben Gestalt darstellen, wie man ihn fühlt. Wenn also ein angeborenes Vermögen da wäre, die Formen der Netzhautbilder zu erkennen, im Sinne der nativistischen Theorie, so hätte der Schlüssel am Ringe und Barte erkannt werden müssen. Dazu kommt die mehrfach erwähnte Unfähigkeit, den Ort eines indirekt gesehenen Objektes mit dem Blicke und der Hand zu finden. Wären die Richtungen der Verbindungslinien zwischen dem zentralen und einem seitlichen Bilde der Netzhaut schon durch angeborene Anschauung bekannt, so könnte es keine große Schwierigkeit gemacht haben, den Blick längs der Verbindungslinie, der Reihe der auf dieser liegenden Bilder folgend, nach dem gewünschten Punkte hinzuführen.

Es scheint mir dagegen nicht zu streiten, daß dieselbe Dame am achtzehnten Tage nach der Operation einfache Formen zu unterscheiden wußte. Wenn man den Blick längs des Umfanges eines Kreises, eines länglichen Rechtecks, eines Quadrates laufen läßt, wird man unter ähnlichen Umständen wohl bald fähig sein, ein geradliniges Begrenzungsstück von einem krummlinigen zu unterscheiden, eine Ecke als solche zu erkennen, zu wissen, ob man den Blick hauptsächlich von oben nach unten, oder von rechts nach links laufen läßt, usw.; was zur Erkennung der genannten Figuren genügen würde. Es ist hierbei nur nötig, den Blick längs einer kontinuierlich fortlaufenden Umfangslinie fortzuführen, was natürlich leichter ist, als ihn nach einem entfernten Objekt im Seitenteil des Gesichtsfeldes hinzuleiten. Auch das Erkennen der Nase, als eines Vorsprunges an dem rötlichen Fleck, den das Gesicht ihres Bruders im Gesichtsfeld bildete, läßt sich auf diese Weise erklären. Die Uhr, die sie am ersten Abend untersuchte, hatte sie in der Hand und erkannte sie also durch das Getast; die Ziffern und Zeiger hat sie nicht als solche bezeichnet, sondern nur bemerkt, daß sie markierte Stellen für das Gesicht seien, während der tastende Finger durch das Uhrglas hindurch nichts davon erkennen konnte. Diese Teile zu zeigen, war ihr möglich, indem sie das Bild ihres Fingers, was sie schon kannte, bis zu dem Bilde der genannten dunklen Objekte heranbewegte.

Andererseits scheint mir die Geschwindigkeit, mit der die Patientin einige Dinge sehen lernte, doch zu groß gewesen zu sein, um zu der Annahme zu stimmen, die Lokalzeichen der Netzhautpunkte seien diskontinuierliche und ungeordnete Zeichen, für welche erst aus Erfahrung gelernt werden müßte, welche Lokalzeichen benachbarten Netzhautpunkten angehören. Wenn die Lokalzeichen aber selbst kontinuierlich über das Feld der Netzhaut veränderliche Größen sind, so würden von vornherein, ohne Erfahrung, benachbarte Netzhautpunkte in der Empfindung als benachbart charakterisiert sein. Nur im

letzteren Fall kann der Eindruck eines beleuchteten Flächenstücks der Netzhaut gleich als Beleuchtung einer zusammenhängenden Fläche im Sehfelde aufgefaßt werden, ohne daß vorausgehende Erfahrung lehrt, daß die Lokalzeichen der erregten Netzhautfasern zusammenliegenden Faserenden und nicht punktförmig im Felde verstreuten angehören[1].*

Geschichte. Die Frage, ob die Kenntnis der Ausmessungen des Gesichtsfeldes angeboren sei oder erworben, wurde von den Sensualisten des vorigen Jahrhunderts eifrig diskutiert. Molyneux warf die Frage auf, ob ein Blindgeborener, der durch das Gefühl einen Würfel von einer Kugel zu unterscheiden gelernt hätte, sie auch sogleich durch das Gesicht unterscheiden würde, wenn er dieses erlangte. Molyneux und Locke[2] antworteten beide mit Nein. Jurin[3] schloß sich dem an, bemerkte nur dabei, daß, wenn der Blindgeborene Würfel und Kugel von verschiedenen Richtungen betrachten dürfte, die letztere ihm immer dieselben, ersterer verschiedene Bilder geben und er sie daran zu unterscheiden vermögen würde. Diese Ansicht, wonach alle Kenntnis der Form in den Gesichtswahrnehmungen auf Erfahrung und Vergleichung mit dem Tastsinn beruhe, blieb während des vorigen Jahrhunderts wohl die herrschende, soweit man überhaupt dieser Frage Aufmerksamkeit zuwandte, bis unter dem Einfluß der Kantschen Lehre, daß der Raum eine angeborene Form unserer Anschauung sei, Johannes Müller[4] die entgegengesetzte Ansicht aufstellte. Nach ihm beruht Fühlen und Sehen auf denselben Grundanschauungen von der Ausbreitung unserer eigenen Organe im Raume. Er geht also aus von der Annahme, daß wir eine angeborene Kenntnis der räumlichen Dimensionen der empfindenden Teile der Netzhaut und ihrer Anordnung von vornherein mitbringen, und daß dadurch die ursprünglichen Ausmessungen des gesehenen flächenhaften Bildes unmittelbar in der Empfindung gegeben sind. Nur das nach außen Sehen, die Beurteilung der Entfernung, der Körperform der Objekte sind ihm durch Erfahrung gegeben. Nach außen sehen, heißt nach J. Müller die Gegenstände als außerhalb unseres Körpers anschauen. Nun sehen wir fortdauernd oder immer wiederkehrend Teile unseres Körpers auf dem Felde unserer Netzhaut abgebildet, und erkennen sie als uns zugehörig, durch unsern Willen unmittelbar beweglich an. Das andere, was wir sehen, wechselt, und wir sehen es also als nicht zugehörig oder äußerlich unserem Körper. Dann lernen wir später die zwei Lokalisationen durch den Tastsinn der Haut und durch das Sehen mit der Netzhaut in der Vorstellung vereinigen. Doch erkennt J. Müller an, daß dies wunderbar scheinen müsse, nämlich

---

[1] Andere Fälle: Grant in Voigts Magaz. IV. 1. S. 21. Hofbauer, Beiträge II. 2. S. 249. Ware, *Phil. Trans.* 1801, p. 332. Home, *Phil. Trans.* 1807. I. p. 834. *Bibl. Britann.* XXXVII. p. 85. Jahr 1808. Trinchinetti in *Arch. des sc. phys. et nat. de Genève.* VI. 336. *Giorn. d. ist. Lomb.* fasc. 46 e 47.

[2] *Essay concerning human understanding.* B. II. Ch. 9. § 8. Siehe auch Berkkeley *New Theory of vision* 1709. Sektion 79.

[3] Smith, *Opticks Remarks*, p. 27. Ebenso Priestley, Geschichte der Optik. II. 512 der deutschen Übersetzung.

[4] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826. — Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz 1840. Bd. II. S. 362.

* Auf die neueren Erfahrungen über das Sehenlernen operierter Personen soll im Schlußkapitel eingegangen werden. K.

vom Standpunkte seiner Theorie aus; er vergleicht es mit den Wahrnehmungen, welche durch gleichzeitige Wirkung des Tastgefühls und durch Betrachten eines Spiegelbildes unseres Körpers (z. B. beim Rasieren) zustande kommen können. Was das Problem des Aufrechtsehens trotz der umgekehrten Lage der Netzhautbilder betrifft, so erscheint uns nach MÜLLER wirklich alles verkehrt, und nur weil unser eigener Körper und die durch den Tastsinn an ihm markierten Stellen uns alle auch verkehrt erscheinen, tritt kein Widerspruch ein. Eigentlich werden also nach dieser Ansicht nicht die Bilder in den äußern Raum durch unser Vorstellen projiziert, sondern der Anschauungsraum ist ein innerer, in den die anderweitigen Wahrnehmungen der Dinge hineingetragen werden. Konsequenter noch hat UEBERWEG[1] diese Seite der MÜLLERschen Theorie dargestellt, während HERING[2] diesen Anschauungsraum zu einem Raum von drei Dimensionen macht und eigentümliche Hypothesen hinzugefügt hat, um die dritte Dimension desselben durch die Anschauung entstehen zu lassen, von denen erst in den folgenden Abschnitten die Rede sein kann. Der letztgenannte hält auch in dem Abschnitt über einäugige Stereoskopie durchaus die Ansicht fest, daß die Netzhaut sich so vollständig in ihrer Räumlichkeit anschaue, daß sogar die Distanzen der Punkte auf ihr nach der geradlinigen Sehne, statt nach dem Bogen geschätzt werden, eine Ansicht, deren Unbrauchbarkeit zur Erklärung der Gesichtstäuschungen, die sie erklären soll, wir schon oben berührt haben, und die in direktem Widerspruche zu stehen scheint mit der in § 118 und 124 desselben Werks gemachten Annahme, wonach eine Ebene der scheinbare Ort der von beiden Netzhäuten übereinstimmend und identisch gesehenen Punkte sein soll.

Eine unmittelbare Kenntnis der Distanzen auf der Netzhaut als Grund der Verteilung der gesehenen Punkte im Sehfelde liegt auch denjenigen Ansichten zugrunde, welche eine unmittelbar angeborene Projektion der Bilder in Richtung bestimmter Linien nach außen annahmen. PORTERFIELD[3] und BARTELS[4] ließen diese Projektion nach den Normalen der Netzhäute geschehen, VOLKMANN[5] nach den Richtungslinien, das heißt den Linien, die durch die hintern Knotenpunkte gehen. In beiden Ansichten ist also wenigstens die Schätzung der Winkeldistanzen im Sehfelde durch angeborene Momente gegeben; ähnlich TOURTUAL[6]. VOLKMANN hat dann später seine Ansicht noch näher dahin spezifiziert, daß er glaubt, die scheinbare Größe der Gesichtswinkel im Sehfelde hinge ab von der Zahl der einzelnen empfindlichen Nervenelemente, welche auf der entsprechenden Strecke der Netzhaut lägen[7]. Die Ansicht von VOLKMANN liegt sehr vielen neueren Arbeiten über Physiologie des Auges zugrunde; so benutzt sie unter anderen namentlich auch RECKLINGHAUSEN[8], um die Erklärung für die Abweichung des scheinbar vertikalen Meridians und andere optische Täuschungen zu geben, indem

[1] Zeitschrift für rationelle Medizin. R. 3. Bd. V. S. 268—282.
[2] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864.
[3] *On the eye.* II. 285.
[4] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Berlin 1834.
[5] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1836.
[6] Die Sinne des Menschen. Münster 1827.
[7] Berichte der Kgl. Sächs. Ges. der Wissenschaften. 30. April 1853.
[8] Archiv für Ophthalmologie. V. 2. S. 127. — POGGENDORFFS Annalen. CX. 65—92.

er die Möglichkeit entsprechender Verziehungen des Netzhautbildes nachzuweisen sucht.

Die Rückkehr der Physiologen zu der älteren entgegenstehenden Ansicht, wonach alle Beurteilung des Räumlichen auf Erfahrungen beruhe, findet ihr Vorspiel auf philosophischer Seite in den Ansichten von HERBART über die Sinneswahrnehmungen. Es war sein metaphysisches Prinzip von der Einheit der Seele, welches ihn veranlaßte, alle Vorstellungen für qualitative und zeitlich einander folgende, nicht nebeneinander bestehende Prozesse zu erklären. Daher mußte er alle Raumanschauung von der Bewegung herleiten und die lokalen Unterschiede der Empfindung mußten qualitative sein. LOTZE war es namentlich, der diese Ansichten auf die faktischen Verhältnisse bei den sinnlichen Wahrnehmungen zu übertragen suchte, und an den sich physiologischerseits zunächst MEISSNER[1] und CZERMAK[2] in ihren Untersuchungen über den Tastsinn anschlossen. In der physiologischen Optik wurde die Aufmerksamkeit zunächst durch das Studium der Bewegungen des Auges wieder in diese Richtung gelenkt. Einer der ersten Schritte war die von BRÜCKE aufgestellte und in den folgenden Abschnitten zu besprechende Ansicht über den Einfluß der Bewegungen beim stereoskopischen Sehen. Ich selbst habe in einem populären Vortrage[3] die Sache von dieser Seite dargestellt. W. WUNDT[4] hat das Verdienst, den ersten vollständigeren Versuch gemacht zu haben, die Bildung des Sehfeldes aus den Bewegungserfahrungen herzuleiten, eine Aufgabe, deren Existenz und Wichtigkeit so gut wie ganz vergessen war. Er betrachtet darin als Lokalzeichen die qualitativen Veränderungen der Empfindung auf verschiedenen Stellen der Netzhaut, die von PURKINJE, AUBERT und SCHELSKE beobachtet waren und oben Bd. II, S. 128—129 erwähnt wurden. Ich habe diese Annahme in der oben gegebenen Darstellung nicht benutzt, weil ich nicht sehe, wie der Eindruck z. B. von Schwarz in der Mitte des Feldes von Rot auf dem Randteil lokal unterschieden werden kann, wenn kein anderes Erkennungszeichen für den lokalen Unterschied da ist, als der qualitative Unterschied, wonach Rot in der Mitte rot, am Rande des Sehfeldes schwarz erscheint. Die Beurteilung der Distanzen im Sehfelde leitet WUNDT ab von dem Gefühl der Muskelanstrengung, welche nötig sei, um sie mit dem Blicke zu durchlaufen. Da die Erfahrung lehrt, daß das Urteil über die Muskelanstrengungen einige Sicherheit nur hat, wenn fortdauernd die Wirkungen derselben mit den Gesichtsbildern verglichen werden, so bin ich von den möglichen Erfahrungen über die Kongruenz gleicher Strecken von korrespondierender Richtung ausgegangen, welche Annahme, wie mir scheint, wesentlich bestätigt wird durch die Erfahrung, daß Strecken von übereinstimmender Richtung genau und sicher verglichen werden, solche von nicht übereinstimmender Richtung nicht. Dadurch wird freilich nicht ausgeschlossen, daß nicht auch das von WUNDT in Anspruch genommene Gefühl der Muskelanstrengung mitbenutzt werde.

Die Untersuchungen über die Genauigkeit des Augenmaßes wurden zunächst

[1] Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Haut. Leipzig 1852. — Zeitschrift für rationelle Medizin. R. 2. Bd. IV. S. 260.

[2] Sitzungsberichte der K. K. Akademie der Wiss. zu Wien, 1855. XV. 466 u. XVII. 577. — MOLESCHOTTS Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen. I. 183.

[3] Über das Sehen des Menschen. Leipzig 1855.

[4] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig u. Heidelberg 1862. Abdrücke aus Zeitschr. für rat. Medizin 1858—1862.

veranlaßt durch E. H. WEBERS[1] Gesetz, welches später von FECHNER[2] als psychophysisches Gesetz bezeichnet worden ist und wonach die kleinsten empfindbaren Unterschiede proportional der ganzen empfundenen Größe sind. Außer den beiden Genannten hat namentlich auch VOLKMANN[3] eine große Reihe sorgfältiger Messungen angestellt. Den Einfluß der Zeit, welche zwischen zwei solchen Vergleichungen verstreicht, hat F. HEGELMAYER[4] untersucht.

Den konstanten Fehler in der Vergleichung horizontaler und vertikaler Distanzen hat A. FICK zuerst bemerkt[5], die konstante Abweichung des scheinbar vertikalen Meridians RECKLINGHAUSEN[6], letzterer auch die scheinbare Krümmung der geraden Linie in den peripherischen Teilen des Sehfeldes, die Gesichtstäuschungen an Linienmustern ZÖLLNER[7], dessen Entdeckung dann von HERING[8], A. KUNDT[9] und AUBERT[10] weiter verfolgt wurde.

Die ältere Geschichte und Literatur der Untersuchungen über den blinden Fleck, wobei es sich hauptsächlich um den Nachweis der Tatsache und um die physiologische Erklärung der Blindheit handelt, ist Bd. II, S. 38—40 gegeben. Die Untersuchungen über die Art der Ausfüllung der Lücke in der Vorstellung beginnen mit E. H. WEBERS[11] Untersuchungen, denen sich A. FICK und P. DU BOIS REYMOND[12] und VOLKMANN[13] anschlossen, die fast ausschließlich richtige Lokalisation der rings um den Fleck gesehenen Objekte beobachteten und die Ausfüllung der Lücke psychologisch erklärten. Dagegen trat WITTICH[14] auf mit der Beobachtung falscher Lokalisationen, während FUNKE[15] auf die Möglichkeit und das Vorkommen von individuellen Unterschieden in dieser Beziehung aufmerksam machte.

1709. BERKELEY, *New Theory of vision.* Sektion 79.
— LOCKE, *Essay concerning human understanding.* B. II. Ch. 9. § 8.
1738. SMITH, *Opticks. Remarks.* p. 27.
1759. PORTERFIELD, *On the eye.* II. 285.
1772. PRIESTLEY, Geschichte der Optik. II. 512 der deutschen Übersetzung.
1801. J. WARE, *Case of a young gentleman who recovered his sight. Phil. Trans.* 1801. XCI. p. 382—396.

[1] Über den Tastsinn und das Gemeingefühl. S. 559 in WAGNERS physiologischem Wörterbuch. — Programmata collecta, Fasc. III. 1851. — Berichte der Sächs. Ges. 1852. S. 85 ff.

[2] Elemente der Psychophysik. Leipzig 1860. Bd. I. S. 211—236.

[3] Berichte der Sächs. Ges. 1858. S. 140. — Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1863. Heft I. S. 117—139.

[4] VIERORDTS Archiv XI. S. 844—853.

[5] De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburg 1851. Auszug in Zeitschrift für rationelle Medizin. R. 2. Bd. II. S. 83.

[6] In den oben zitierten Aufsätzen.

[7] POGGENDORFFS Annalen CX. S. 500—523.

[8] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861. Heft I. S. 65—80.

[9] POGGENDORFFS Annalen CXX. S. 118.

[10] Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 269—271.

[11] Über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Verh. der Sächs. Ges. 1852. S. 138.

[12] MÜLLERS Archiv für Anat. 1853. S. 396.

[13] Berichte der Königl. Sächs. Ges. 30. April 1853. S 40.

[14] Archiv für Ophthalmologie. IX, 3. 1863. S. 1—31.

[15] Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br. Bd. III. Heft 3. S. 12 u. 13.

1811. Steinbuch, Beiträge zur Physiologie der Sinne.

1826. J. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. 1.

— J. Wardrop, *Case of a lady, born blind. Phil. Trans.* 1826. III. 529—540.

1827. Tourtual, Die Sinne des Menschen. Münster.

1834. Bartels, Beiträge zur Physiologie des Gesichts. Berlin.

1836. Volkmann, Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig.

1840. J. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz. Bd. II. S. 362.

1847. Trinchinetti, *Observations sur les premières impressions visuelles, aperçues par deux aveugles de naissance après l'opération de la cataracte. Arch. d. sciences phys. et natur.* VI. 336; *Giornale dell' istituto Lombardo* 1847, fasc. 46 e 47.

1849. Waller, *Sur un cas, où la vue altérée faisait voir les objets plus petits que nature. Institut.* XVII. Nr. 787, p. 39.

1851. E. H. Weber, Programmata collecta. Fasc. III. — Über den Tastsinn und das Gemeingefühl S. 559 in R. Wagners Wörterbuch der Physiologie.

— Fick, De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburg. Auszug in Zeitschr. für ration. Medizin. 2. Bd. II. S. 83.

1852. E. H. Weber, Über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Berichte der Sächs. Ges. S. 85 ff.

1853. Derselbe, Über Größe, Lage und Gestalt des sogenannten blinden Flecks im Auge und die davon abhängigen Erscheinungen. Berichte der Sächs. Ges. 1853, S. 149 bis 158; Fechner, Zentralblatt 1853, S. 929—941.

— A. Fick und P. du Bois-Reymond, Über die unempfindliche Stelle der Netzhaut im menschlichen Auge. Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1853. S. 396—407; Fechner, Centralblatt. 1854. S. 57—72.

— A. W. Volkmann, Über einige Gesichtsphänomene, welche mit dem Vorhandensein eines unempfindlichen Fleckes im Auge zusammenhängen. Berichte der Sächs. Ges. 1853. S. 27—50. Fechner, Centralblatt. 1854. S. 57—72.

1854. J. Czermak, Über die unempfindliche Stelle der Retina im menschlichen Auge. Wiener Ber. XII. 358—364.

1855. J. J. Oppel, Über geometrisch-optische Täuschungen. Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1854—55. S. 37—47.

— H. Aubert, Über den blinden Fleck. Jahresber. d. Schles. Ges. 1854. S. 25—28.

— Budge, Beobachtungen über die blinde Stelle der Netzhaut. Verhandl. des naturhist. Vereins der Rheinlande. 1855. S. XLI.

1856. Aubert und Förster, Über den Raumsinn der Netzhaut. Jahresber. der Schles. Ges. 1856. S. 33—34.

1858. A. W. Volkmann, Über den Einfluß der Übung auf das Erkennen räumlicher Distanzen. Leipziger Ber. X. 38—69.

— Derselbe, Über das Vermögen, Größenverhältnisse zu schätzen. Leipziger Ber. X. 173—204.

— G. T. Fechner, Über ein psychophysisches Grundgesetz. Abhandl. d. Leipziger Ges. VI. 457—532.

— J. J. Oppel, Nachlese zu den geometrisch-optischen Täuschungen. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1856—57, S. 47—55, und 1860—61, S. 26—37.

— Ueberweg, Zur Theorie der Richtung des Sehens. Zeitschr. für ration. Medizin. 3. Bd. V. S. 268—282.

1859. F. v. Recklinghausen, Netzhautfunktionen. Archiv für Ophthalmologie. V, 2. S. 127—179. Poggenddorffs Ann. CX. 65—92.

— Hegelmayer, Über Sinnengedächtnis. Vierordts Archiv. XI. S. 844—853.

1860. F. Zöllner, Über eine neue Art von Pseudoskopie. Poggend Ann. CX, 500 bis 525. *Cosmos* XVIII. 289—290; Zeitschr. für Naturw. XVI. 60—63.

1861. E. Hering, Beiträge zur Physiologie. Leipzig. Heft 1. S. 65—80.

— E. Mach, Über das Sehen von Lagen und Winkeln durch die Bewegung des Auges. Wien. Ber. XLIII, 2. S. 215—224.

— F. Zöllner, Über die Abhängigkeit der pseudoskopischen Ablenkung paralleler Linien von dem Neigungswinkel der sie durchschneidenden Querlinien. Poggend. Ann. CXIV. 587—591.

1861. E. Bacaloglo, Über die von Herrn Zöllner beschriebene Pseudoskopie. Poggend. Ann. CXIII, 333—336 Zeitschr. für Naturw. XVIII, 445.

1862. WUNDT, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmungen. Leipzig u. Heidelberg 1862. Abdruck aus der Zeitschr. für ration. Medizin 1858—1862.
1863. A. W. VOLKMANN, Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1863. Heft I. 139—180.
1864. v. WITTICH, Studien über den blinden Fleck. Archiv für Ophthalmologie. IX, 3. S. 9—46.
— O. FUNKE. Zur Lehre vom blinden Fleck. Berichte der naturf. Ges. zu Freiburg im Breisgau. Bd. III. Heft 3.
1865. AUBERT, Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 296—271.

Zusätze von v. Kries.

1. Als spätere Untersuchungen über die Genauigkeit des Augenmaßes in dem hier behandelten Sinne mögen die Beobachtungen von BINET[1], BINET und HENRI[2] und GIESING[3] hier Erwähnung finden, die sich mit den in dieser Hinsicht ermittelten Leistungen von Schulkindern beschäftigen, sowie die von RICHTER und WAMSER[4], die sich teils auf Erwachsene, teils gleichfalls auf Schulkinder beziehen.

Im Hinblick auf die im Text erwähnte Art, wie wir bei der Vergleichung insbesondere paralleler Strecken unwillkürlich zu Werke gehen, kann die Frage aufgeworfen werden, wie sich das Augenmaß gestaltet, wenn die Bedingungen in dieser Hinsicht irgendwie abweichend festgelegt werden. In dieser Beziehung sind Versuche von MÜNSTERBERG[5] anzuführen, der zeigte, daß bei Ausschluß der Augenbewegungen, wo also lediglich die Größe der Netzhautbilder dem Vergleich zugrunde liegt, die Sicherheit in der Tat erheblich beeinträchtigt wird. Der variable Fehler seiner Einstellungen stieg z. B., nachdem er bei frei beweglichem Blick 2,1 % betragen hatte, bei fixiertem Blick auf 4,3 %.

Versuche, in denen umgekehrt eine Verwertung der Größe der Netzhautbilder ausgeschlossen und lediglich der Umfang der Blickexkursionen für den Größeneindruck bestimmend war, habe ich angestellt[6]. Die Aufgabe bestand hier allerdings nicht eigentlich in einer Vergleichung sondern darin, eine Strecke von bestimmter Länge (50 mm) frei aus dem Gedächtnis einzustellen. Es wurde hierbei so verfahren, daß eine Nadelspitze zwischen zwei auf wechselnden Abstand zu fixierenden Anschlägen hin- und hergeschoben und die Aufgabe gestellt wurde, die Größe ihrer Bahn auf jenen Wert einzustellen. Wenn die Endpunkte der Bahn nicht markiert sind, so kann unter diesen Umständen für den Größeneindruck nur die Exkursion des dem bewegten Gegenstande folgenden Auges bestimmend sein. Es fand sich, daß der variable Fehler der Einstellungen, der bei gewöhnlichem Verfahren sich auf 1,78 % belaufen hatte, auf 3,26 % im Durchschnitt anwuchs, also auch fast auf das Doppelte.

Man ersieht hieraus, wie unter gewöhnlichen Bedingungen durch das Zu-

[1] *Revue philosophique* 1890.
[2] *Revue scientifique* 1894.
[3] Zeitschrift für Psychologie. XXXIX. 1905. S. 42.
[4] Zeitschrift für Psychologie. XXXV. 1904. S. 321.
[5] MÜNSTERBERG, Beiträge zur experimentellen Psychologie. II. 1889. S. 164.
[6] v. KRIES, Beiträge zur Lehre vom Augenmaß. Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, HELMHOLTZ-Festschrift 1894.

sammenwirken beider Momente, Größe der Netzhautbilder und Bewegung des Blicks die günstigsten Ergebnisse erzielt werden[1].

2. Über das Augenmaß für Winkel liegt eine Anzahl neuerer Untersuchungen vor von JACKSON, GUILLERY, BIEHLER[2].

Wir müssen hierbei zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Aufgaben auseinanderhalten, die absolute Erkennung mathematisch definierter Formen (als welche vorzugsweise der rechte Winkel und der sogen. gestreckte d. h. die Geradlinigkeit in Frage kommen) und die Vergleichung zweier Winkel von beliebigem Betrage.

Was die ersteren Aufgaben anlangt, so fand GUILLERY die Knickung einer Geraden noch erkennbar, wenn der von den aneinanderstoßenden Teilen gebildete Winkel nur 23′ betrug.

BIEHLER bemühte sich bei verschiedener Neigung des einen (festgelegten) Schenkels gegen die Vertikale rechte Winkel einzustellen. Die hierbei gefundenen konstanten und variablen Fehler zeigt die folgende Tabelle (0 bezeichnet die vertikale Lage, die Abweichungen im Sinne des Uhrzeigers sind positiv gerechnet).

Lage der gegebenen Geraden	Konstanter Fehler	Variabler Fehler
0°	− 0° 19′	0° 13′
30°	+ 2° 8′	0° 36′
45°	+ 4° 18′	0° 39′
70°	+ 2° 57′	0° 23′
90°	+ 1° 54′	0° 12′
110°	− 0° 42′	0° 20′
135°	− 3° 32′	0° 26′
150°	− 2° 28′	0° 17′

Abgesehen von den in den konstanten Fehlern sich ausdrückenden Abweichungen der Mittelwerte ist beachtenswert, daß die Sicherheit der Einstellung am kleinsten, die variabeln Fehler am größten bei den schiefen Lagen 45 und 135 gefunden werden.

Bei der zweiten Art der Aufgaben suchte BIEHLER die wirkliche Vergleichung der Winkelgröße (unter Ausschluß des im Parallelismus der Schenkel gegebenen Hilfsmittel) zu prüfen und ließ zu diesem Zwecke Winkel von verschiedener Größe nach Vorlagen nachzeichnen, jedoch in einer um etwa 45 gegen das Muster gedrehten Lage. Es zeigte sich, daß diese Aufgabe am besten gelöst werden kann, wenn die nachzuzeichnenden Winkel sich 90 oder 180 nähern. Die konstanten sowohl wie die variabeln Fehler erreichen dagegen ihre höchsten Werte bei schiefen Winkeln etwa in dem Betrage von 60 und 140°.

3. Die Täuschungen des Augenmaßes, die (von Entfernungsverhältnissen unabhängig) also insbesondere an ebenen Zeichnungen zu beobachten und durch

[1] Die hier zuletzt erwähnten Beobachtungen gehören übrigens im strengen Sinne schon dem folgenden Paragraphen an, der die Bedeutung der Augenbewegung für die wahrgenommenen Richtungen behandelt. Da indessen diese eben für die Ausmessung des monokularen Gesichtsfeldes eine Rolle spielen, so müssen sie auch an dieser Stelle bereits Erwähnung finden.

[2] J. JACKSON, *On the judgement of angles and position of lines. Amer. Journal of psychology.* V, 2. 1893. S. 241. — GUILLERY, PFLÜGERS Archiv. LXXV. 1899. S. 466. — W. BIEHLER, Beiträge zur Lehre vom Augenmaß für Winkel. Dissert. Freiburg 1896.

die besondere Beschaffenheit der Zeichnung bestimmt sind, pflegt man neuerdings, soweit es sich um relativ einfache mathematisch definierbare Formen (nicht etwa die Darstellungen komplizierter Objekte, wie lebende Gebilde u. dgl.) handelt, als geometrisch-optische Täuschungen zu bezeichnen. Sie sind in den letzten Jahren Gegenstand ungemein zahlreicher Untersuchungen und theoretischer Erörterungen gewesen. Eine auch nur annähernd vollständige Wiedergabe des gesamten hierher gehörigen Materials ist an dieser Stelle völlig ausgeschlossen; auch darf darauf mit Rücksicht auf das doch überwiegend psychologische Interesse des Gegenstandes verzichtet werden. Wir werden uns daher hier darauf beschränken müssen und dürfen, das im Text schon Beigebrachte durch die Anreihung einiger besonders interessanter oder auffälliger Täuschungen, sowie der wichtigsten zu ihrer Erklärung herangezogenen Prinzipien zu ergänzen und schließlich einige allgemeine Bemerkungen über das ganze Gebiet hinzuzufügen.

Was zuvörderst die schon im Text angeführten Täuschungen anlangt, so ist insbesondere die ZÖLLNERsche sehr zahleichen Untersuchungen unterworfen werden, die ihren Betrag und die Bedingungen ihres Entstehens betreffen. Es ist in dieser Hinsicht zunächst anzuführen, daß nach HERING[1] (dem Befunde von HELMHOLTZ entgegengesetzt) die Täuschung im Nachbilde fortbesteht, wonach die Bewegungen des Auges keine maßgebende Bedeutung für ihre Entstehung besitzen würden.

WITASEK[2] änderte die Bedingungen in der Weise ab, daß die geraden parallelen Streifen von einem, die schräg laufenden Liniensysteme vom anderen Auge gesehen wurden, somit die ZÖLLNERsche Figur durch binokulare Vereinigung zustande kam. Er fand hierbei den Betrag der Täuschung sehr vermindert, eine Tatsache, an die er bedeutungsvolle Überlegungen knüpfte, auf die wir im Schlußkapitel zurückkommen.

Über die Abhängigkeit der ZÖLLNERschen Täuschung von der Farbe sind einige Beobachtungen von BENUSSI[3] mitgeteilt worden.

In einer ganzen Reihe von Modifikationen ist die sogen. POGGENDORFFsche Täuschung verfolgt worden[4]. In Fig. 39 scheint der linke obere Teil der unterbrochenen Geraden nicht als Fortsetzung des rechten unteren, sondern zu hoch gelegen; außerdem hat man den Eindruck, daß nicht die untere, sondern die obere der beiden linken Linien gegen den Schnittpunkt jener Geraden mit der rechten Vertikallinie zielt. In Fig. 40 erscheint das Mittelstück der schrägen (unterbrochenen) Geraden nicht in gleicher Richtung mit den beiden äußeren Teilen sondern gegen diese im Sinne des Uhrzeigers gedreht. Noch frappierender ist die Täuschung in Fig. 41, wo die schrägen Linien der rechten Seite wiederum (dem Eindruck entgegen) gegen die Punkte gerichtet sind, wo die linken den senkrechten Streifen treffen.

Als eine Art Kontrast läßt es sich auffassen, wenn eine bestimmte Größe in der Benachbarung größerer verkleinert und der Benachbarung kleinerer ver-

---

[1] HERING, Beiträge zur Physiologie. Heft 1. 1861.

[2] WITASEK, Zeitschr. f. Psychologie usw. XIX. 1899. S. 81.

[3] BENUSSI, Über den Einfluß der Farbe auf die Größe der ZÖLLNERschen Täuschung. Ztschr. für Psychologie usw. XXIX. 1902. S. 264 u. 385.

[4] DELBOEUF, *Notes sur certaines illusions d'optique. Bulletins de l'acad. roy. de Belg.* 2me S. XIX. S. 195. 1865; *Seconde note sur de nouvelles illusions d'optique*, ebenda XX. S. 70. *Une nouvelle illusion d'optique*, ebenda XXIV. S. 545. 1893.

größert erscheint. Einen Fall dieser Art stellt eine der von Müller-Lyer[1] beschriebenen Täuschungen dar, wo eine bestimmte Erstreckung als Teil einer kürzeren Linie größer, innerhalb einer längeren kleiner erscheint (Fig. 42). Eben dahin gehört auch die von Baldwin beschriebene Täuschung, Fig. 43, wo der mittlere Punkt dem linken großen Kreise etwas näher als dem rechten

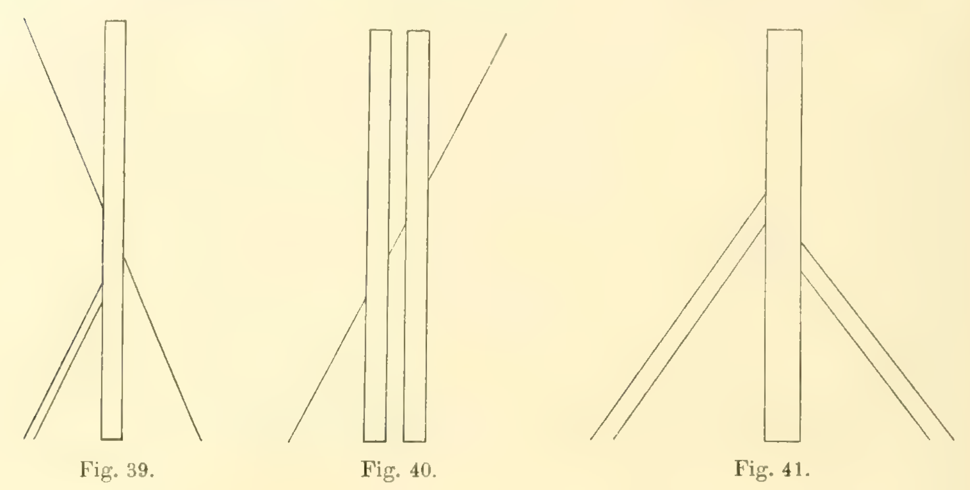


Fig. 39. Fig. 40. Fig. 41.

kleinen zu liegen scheint. Nicht minder wird man eine von Loeb[2] beschriebene Täuschung den Kontrastphänomenen zurechnen dürfen. In Fig. 44 scheint die obere Linie des linken Paares deutlich höher als die untere des rechten zu

Fig. 42.

liegen. Auch die von Loeb formulierte Regel ordnet sich (wir kommen darauf noch zurück) dem Kontrastprinzip unter.

In gewisser Weise den Verhältnissen des Kontrasts entgegengesetzt sind dagegen andere Fälle, in denen räumliche Gebilde sich zu einem Gesamteindruck zu vereinigen scheinen und demgemäß Beziehungen, die für diese Gesamtgebilde gegeben sind, auch auf Teile übertragen werden, für die sie nicht zutreffen, ein Verhalten, das wir mit dem von Müller-Lyer a. a. O. eingeführten Namen **Konfluxion** bezeichnen. Hierher gehört wohl die nach diesem Autor benannte Täuschung Fig. 45. Von den in Wirklichkeit gleichlangen senkrechten Linien erscheint zufolge der ihren Enden angefügten gabligen Ansätze die rechte beträchtlich länger als die linke.

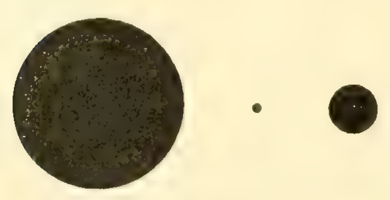


Fig. 43.

[1] Müller-Lyer, Über Kontrast und Konfluxion. Zeitschr. f. Psych. IX. S. 1 und X. S. 421. 1894. — Derselbe, Optische Urteilstäuschungen. Archiv f. Physiologie. 1889. Suppl. S. 263.

[2] Loeb, Über den Nachweis von Kontrasterscheinungen im Gebiete der Raumempfindungen des Auges. Pflügers Archiv LX. S. 509. 1895. — Derselbe, Über Kontrasterscheinungen im Gebiete der Raumempfindungen. Zeitschr. f. Psych. 16. S. 298. 1898.

Eben dahin kann wohl auch die von Bourdon[1] angegebene Täuschung der Fig. 46 gerechnet werden, in der auch der (in Wirklichkeit geradlinige) obere Umriß nach oben konvex erscheint.

Eine sehr frappante Täuschung ergeben die untenstehenden beiden kongruenten Figuren (47), von denen die obere auffällig größer erscheint. Ähnliches ist in zahlreichen Modifikationen (Figuren von Trapezform u. a.) beschrieben worden. Als eine besondere Art von Täuschung sind ferner diejenigen hier anzureihen, die sich nicht auf lineare und Winkelgrößen, sondern auf Krümmungen beziehen. Höfler[2] hat hierfür den bezeichnenden Namen des Krümmungskontrasts eingeführt.

Fig. 44.

Mit messenden Bestimmungen der geometrisch-optischen Täuschungen haben sich Burmester[3] und Heymans[4] beschäftigt, wobei denn auch die Abhängigkeit des Täuschungsgrades von einer Anzahl von Variabeln ins Auge gefaßt wurde.

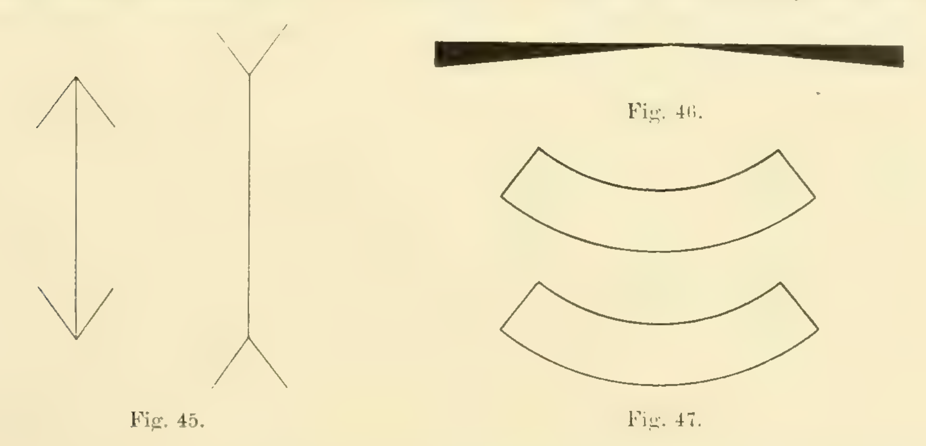


Fig. 46.

Fig. 45. Fig. 47.

Was die zur Erklärung heranzuziehenden Prinzipien anlangt, so können wir diejenigen an die Spitze stellen, die an bestimmte uns bekannte physiologische Verhältnisse anknüpfen.

Hierher gehört die schon im Text (S. 168) erwähnte und, wie ich glaube, mit Recht als unangängig abgelehnte Annahme Herings[5], daß der Größeneindruck sich nicht nach dem Winkel- (und Bogen-) abstand der Netzhautbilder, sondern nach der Länge der sie verbindenden Sehne richte.

[1] Bourdon, La perception visuelle de l'espace. 1902.

[2] Höfler, Krümmungskontrast. Zeitschr. f. Psych. X. S. 99.

[3] Burmester, Beitrag zur experimentellen Bestimmung geometrisch optischer Täuschungen. Zeitschr. f. Psych. XII. 1896. S. 355.

[4] Heymans, Quantitative Untersuchungen über die Zoellnersche und die Loebsche Täuschung. Zeitschr. f. Psych. XIV. 1897. S. 161.

[5] Zur Vermeidung von Verwechselungen sei hier darauf hingewiesen, daß die Erklärung, die Hering für die sogenannte Kundtsche Täuschung gibt und die auf der Annahme einer gewissen Unsymmetrie der Raumwerte beruht, von der hier berührten Vorstellung ganz unabhängig ist. Ich habe diese Täuschung, da sie m. E. ihrem ganzen Wesen nach von den geometrisch-optischen Täuschungen verschieden ist, hier gar nicht erwähnt; auf sie sowie auf Herings Erklärung derselben werden wir an späterer Stelle einzugehen haben.

Die Bedeutung der Irradiation, auf die auch HELMHOLTZ bereits hinwies, wurde später namentlich von LEHMANN[1] und MÜNSTERBERG[2] betont. WUNDT[3] hat gemäß seiner ganzen Theorie des Raumsinns auch die geometrisch-optischen Täuschungen vor allem mit den Bewegungen des Auges in Verbindung zu bringen gesucht. Auch die von DRESSLAR[4] versuchte Erklärung der POGGENDORFFschen Täuschung geht von gewissen Verhältnissen der Augenbewegungen aus. Ähnlich stützt KIESOW[5] seine Erklärungen auf die Verhältnisse von Bewegungsimpulsen.

Ein weiteres und gewiß sehr beachtenswertes Moment, auf das zuerst EINTHOVEN[6] die Aufmersamkeit gelenkt hat, bildet die undeutliche Wahrnehmung der indirekt gesehenen Gegenstände. Da man sich „bei der Ortsbestimmung einer undeutlich aufgenommenen Figur durch den Schwerpunkt ihres Netzhautbildes führen läßt", so können Figuren oder Figurenteile im indirekten Sehen mehr oder weniger verschoben werden. Es ist klar, daß man versuchen kann, die als Konfluxion bezeichneten Erscheinungen hiermit in Verbindung zu bringen.

Unter den andersartigen Erklärungsprinzipien darf hier das des Kontrastes an erster Stelle erwähnt werden, das, von zahlreichen Autoren freilich mit mancherlei Verschiedenheiten der Formulierung und spezielleren Auffassung herangezogen worden ist. Ich muß hier sogleich darauf hinweisen, daß in der Tat wohl die von HELMHOLTZ gegebene Formulierung dieses Prinzips keine ganz glückliche und ausreichende ist. HELMHOLTZ formuliert das in Rede stehende Prinzip dahin, daß „deutlich zu erkennende Unterschiede bei allen Sinneswahrnehmungen größer erscheinen als undeutlich zu erkennende Unterschiede von gleicher objektiver Größe". (S. 159.)

Wie mir scheint entspricht das nicht recht dem, was schon der gewöhnliche Sprachgebrauch unter Kontrast versteht; und wir gelangen im Anschluß an diesen zu einer auch für unsere Zwecke bedeutungsvolleren Zusammenfassung. Überall bedeutet ja der Kontrast die Modifikation eines Eindrucks, die zufolge eines Gegensatzes oder Unterschiedes stattfindet. Geht man hiervon aus, so wird man, wie mir scheint, das Gesetz des Kontrastes etwa folgendermaßen ausdrücken können: Überall wo wir eine Reihe stetig veränderlicher Vorstellungsinhalte in eine Reihe ordnen können (derart, daß der Übergang von je einem zum folgenden Element uns als eine Veränderung von gleicher Art oder in gleichem Sinne erscheint), finden wir, daß der Eindruck des einzelnen Elementes (sei es nun wirklich, sei es scheinbar) modifiziert wird, wenn er in zeitlicher oder räumlicher Benachbarung mit einem anderen gegeben ist, und zwar derart, daß er in der von diesem anderen abgewendeten Richtung verschoben erscheint. Dieser Regel entspricht

[1] LEHMANN, Irradiation als Ursache geometrisch-optischer Täuschungen. PFLÜGERS Archiv CIII. 1904. S. 84.

[2] MÜNSTERBERG, Die verschobene Schachbrettfigur. Zeitschr. f. Psych. XV. 1897. S. 184.

[3] WUNDT, Die geometrisch-optischen Täuschungen. Abh. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wissensch. Math.-physikal. Kl. XXIV. 2. 1898. Derselbe, Zur Theorie der räumlichen Wahrnehmung. Philos. Studien. 14. S. 1—119. 1898.

[4] DRESSLAR, *A new illusion for touch and an explanation for the illusion of displacement of certain cross lines in vision. Amer. Journ. of psychol.* VI. 1894. S. 275.

[5] KIESOW, Über einige geometrisch-optische Täuschungen. Arch. f. d. ges. Psych. VI. S. 289.

[6] EINTHOVEN, Eine einfache physiologische Erklärung für verschiedene geometrisch-optische Täuschungen. PFLÜGERS Archiv LXXI. 1898. S. 1.

es, daß das mittlere Grau nach oder neben Schwarz gesehen heller, nach oder neben Weiß gesehen dunkler erscheint; nicht minder aber, daß eine parallele Erstreckung neben zahlreichen Eindrücken einer in dem betreffenden Sinne stattfindenden Konvergenz divergierend, neben dem von divergenten Linienpaaren konvergent erscheint. Geht man von dieser Auffassung aus, so ist ersichtlich, daß es sich um ein Prinzip von überaus mannigfaltiger Anwendung handelt. In der Tat erstreckt sich seine Bedeutung auf alle Fälle, in denen wir Vorstellungsinhalte in eine gleichsinnig fortschreitende Reihe ordnen können oder verschiedene Stufen als gleichsinnige erscheinen; und es hängt mit fundamentalen hier nicht weiter zu verfolgenden psychischen Tatsachen zusammen, daß dieses in einem so überaus großen, ja wie man wohl sagen darf ganz unbegrenzten Umfange stattfindet. So kontrastiert denn nicht nur Ort mit Ort, sondern auch Richtung mit Richtung, Konvergenz und Divergenz, stärkere und schwächere Krümmung usw.

Faßt man das Wesen des Kontrastes in dieser Weise auf, so ordnet sich ihm ohne weiteres z. B. die von LOEB aufgestellte Regel unter, derzufolge „zwei Punkte oder Linien von verschiedenen Raumwerten, die gleichzeitig der Aufmerksamkeit unterliegen, sich so beeinflussen, als ob sie sich gegenseitig abstießen."

Eine Anzahl von Erklärungen stellen m. E. wesentlich Umschreibungen des Kontrastprinzips dar oder sind Versuche, dieses selbst greifbarer und verständlicher zu machen oder tiefer zu begründen. Hierher dürfen wohl die Erklärungen der ZÖLLNERschen Täuschung von CLASSEN[1], BRENTANO[2], sowie von ihrem Entdecker selbst[3] gerechnet werden. Als eine Modifikation des Kontrastprinzips schließt sich hier wohl auch die HEUSEsche Erklärung[4] der HERINGschen Täuschung an, nach der die von den schrägen Linienpaaren eingeschlossenen Winkel in der Richtung ihrer Divergenz kleiner zu werden scheinen, weil jeder folgende in die auseinanderlaufenden Schenkel des vorhergehenden eingeschlossen ist.

Die Konfluxion ist, wie oben schon erwähnt, zuerst hauptsächlich von MÜLLER-LYER als Erklärungsprinzip aufgestellt und in ihrer Bedeutung gewürdigt worden. Die von BRUNOT[5] gegebene Erklärung der MÜLLER-LYERschen Täuschung ordnet sich ihm gleichfalls unter.

In noch ausgeprägterer Weise als dies schon bei den beiden zuletzt erwähnten Prinzipien der Fall ist, werden spezifisch psychologische Momente herangezogen, wenn wir zur Erklärung auf nicht wirklich wahrgenommene, sondern durch die Einbildungskraft erzeugte Vorstellungen rekurrieren. In erster Linie kann es sich dabei um Fortsetzungen, Ergänzungen der gesehenen Figuren u. dgl. handeln. Man kann auf dieser Grundlage die Bedeutung des Kontrastprinzips sich wesentlich erweitert denken. Hierher werden wir es rechnen dürfen, wenn wir die Erklärung der Fig. 47 uns in der Weise zurechtlegen, daß in der Phantasie eine divergente Fortsetzung der oberen Figur ergänzt werde, der gegenüber nun die untere im Kontrast kleiner erscheint.

[1] CLASSEN, Physiologie des Gesichtssinnes. Jena 1876.

[2] BRENTANO, Zeitschrift für Psychologie. III. S. 349.

[3] ZÖLLNER, Über die Natur der Kometen. Leipzig 1872. S. 378.

[4] HEUSE, Noch einmal das ZÖLLNERsche Muster. Archiv f. Ophth. XXV. (1). S. 121. 1879.

[5] BRUNOT, *Les illusions d'optique. Revue scientifique.* LII. (7). 1893. S. 210.

Zu Gedanken noch ganz anderer Art gelangen wir schließlich, wenn wir, wie es namentlich von Lipps[1] geschehen ist, noch verwickeltere Betätigungen die Einbildungskraft in den Bereich der Betrachtung ziehen und uns an die Wahrnehmung der Figuren Vorstellungen von Kräften und Bewegungen, von einem Wachsen und Streben, Drücken und Ziehen, Spannungen, Widerständen usw. geknüpft denken. Es ist klar, daß sich den Erklärungsmöglichkeiten hiermit ein überaus weites Feld eröffnet, nicht minder freilich auch, daß es ungemein schwierig ist, über ihre tatsächliche Bedeutung ein Urteil zu gewinnen.

Zu einem besonderen hier schließlich noch kurz zu berührenden Erklärungsprinzip gelangen wir, wenn wir beachten, daß unter Umständen die ebenen Figuren nicht eben, sondern mit Tiefenunterschieden gesehen werden und die Größentäuschungen mit diesen Tiefeneindrücken zusammenhängen können. Fälle dieser Art sind durch passende perspektivische Zeichnungen leicht herzustellen. Bekannt und sehr verbreitet ist z. B. eine Zeichnung, in der drei menschliche Figuren von gleicher Höhe übereinander angebracht sind, und zwar in Verbindung mit der perspektivischen Darstellung einer Treppe, die in der Richtung vom Beschauer fort ansteigt. Die oberste Figur scheint oben an der Treppe zu stehn, erscheint somit am entferntesten und auch am größten, die unterste am nächsten und kleinsten.

Auch eine von Bezold[2] beschriebene Täuschung ist von dieser Art. Natürlich kommen in diesen Fällen schon die erst an späterer Stelle zu besprechenden Beziehungen zwischen Entfernungs- und absolutem Größeneindruck ins Spiel. Für die überwiegende Mehrzahl der geometrisch-optischen Täuschungen ist wohl an die Einmischung solcher Verhältnisse nicht zu denken.

Endlich wäre hier anzuführen, daß Witasek[3] in seiner beachtenswerten und namentlich auch als Übersicht des ganzen Gebietes wertvollen Arbeit versucht hat, zwei fundamental verschiedene Anschauungsweisen zu trennen, von denen die Versuche einer Erklärung überhaupt ausgehen können; er unterscheidet auf Grund dieser Betrachtung Empfindungs- und Urteilshypothesen und scheidet hiernach auch die Erklärungen der Autoren in zwei Kategorien, eine Scheidung, die er freilich nicht erschöpfend durchführbar findet, weil die Darlegungen mancher Autoren in den hierfür wichtigen Hinsichten nicht genügend geklärt sind.

Er selbst entscheidet sich auf Grund der oben bereits erwähnten Versuche über die Zoellnersche Täuschung bei Verteilung der Liniensysteme auf beide Augen für die Empfindungshypothese.

Zusammenfassende kritische Erörterungen über Wert und Berechtigung der verschiedenen Erklärungsprinzipien sind vielfach gegeben worden; so schon in der Mehrzahl der bereits angeführten Arbeiten, außerdem von Blix[4],

[1] Raumästhetik und geometrisch-optische Täuschungen. Leipzig 1897. — Lipps, Zur Verständigung über die geometrisch-optischen Täuschungen. Ztschr. für Psychologie. XXXVIII. 1905.

[2] Bezold, Eine perspektivische Täuschung. Poggendorffs Annalen. XXIII. 1884.

[3] Witasek, a. a. O.

[4] Blix, Die sogen. Poggendorffsche optische Täuschung. Skandin. Archiv. XIII. 1902. S. 192.

Brentano[1], v. Zehender[2] u. a. Ich halte, wie schon bemerkt, ein Eingehen auf diese Verhältnisse nur in beschränktem Umfange für angezeigt. Was ich in dieser Hinsicht beizubringen habe, kann nicht wohl von gewissen ganz allgemeinen Erörterungen über die Natur der räumlichen Wahrnehmung, das Verhältnis von Urteil und Empfindung usw. getrennt werden; und es wird daher zweckmäßig sein, sie dem diese Verhältnisse zusammenfassend behandelnden Schlußkapitel vorzubehalten. Dort wird auch auf die eben erwähnte Unterscheidung von Witasek zurückzukommen sein. K.

§ 29. Die Richtung des Sehens.

Die bisherigen Tatsachen bezogen sich nur auf die relative Lage der verschiedenen leuchtenden Punkte nebeneinander im Gesichtsfeld. Wir müssen nun noch über die Beurteilung ihrer absoluten Richtung sprechen. Dabei ist zunächst zweierlei zu unterscheiden. Im allgemeinen ist die Richtung einer Linie gegeben durch zwei Winkel, die sie mit den Richtungen passend gewählter fester Achsen oder Ebenen bildet, ohne daß wir dabei festsetzen, daß die Linie durch einen bestimmten Punkt gehen solle. Wir schreiben allen mit jener ersten Linie parallelen Linien die gleiche Richtung zu. So haben z. B. alle Magnetnadeln, die innerhalb einer Stadt aufgehängt sind, die gleiche Richtung von Süden nach Norden. Etwas anderes ist es, wenn wir die Richtung nicht nur im allgemeinen gegen ein bestimmtes Koordinatsystem, wie es im Gebiete einer Stadt etwa die Lotlinie, die Niveauebene und in dieser der terrestrische Meridian darstellen, geben, sondern wenn wir die Richtungen alle auf einen bestimmten Mittelpunkt beziehen wollen. Dann sind die Richtungen darzustellen durch ganz bestimmte gerade Linien, die durch den gewählten Mittelpunkt hindurchgehen, und deren Richtung außerdem durch zwei Winkel zu bestimmen ist, die sie mit passend gewählten festen Achsen machen. In diesem Falle kann die Richtung nicht bezeichnet werden durch eine andere parallele Linie, die die gleiche Richtung hat, sondern sie muß dieselbe oder identische Richtung haben, das heißt, wenn hinreichend verlängert, mit der ersten Linie vollständig zusammenfallen.

Solange man nur von Gleichheit der Richtungen spricht, sind also nur Winkel zu bestimmen, welche die Richtung definieren; wenn man von Identität der Richtungen spricht, ist auch der Punkt zu bestimmen, welcher als Mittelpunkt gelten soll. Wir können sagen, daß wir im ersteren Falle nur die Richtung bestimmen, im letzteren Falle eine bestimmte Richtungslinie.

Wenn wir nun von den Richtungen des Sehens sprechen, so beziehen wir diese allerdings auf einen Mittelpunkt, nämlich auf uns selbst und unseren Standpunkt im Raume. Indessen gibt es eine Reihe von Erscheinungen, welche unabhängig sind von der Bestimmung des Mittelpunkts der Richtungslinien. Es sind dies namentlich alle diejenigen, welche beim Sehen entfernter Objekte eintreten können, der Sterne z. B. oder auch weit entfernter Berge und Gebäude.

---

[1] Brentano, Über ein optisches Paradoxon. Zeitschr. f Psychol. III. 1892. S. 349; V. 1893. S. 72.

[2] v. Zehender, Über geometrisch-optische Täuschungen. Zeitschr. f. Psychol. XX. 1899. S. 65.

Denn solche Objekte sind notwendig auch groß, und jede Richtungslinie, die durch irgend einen Punkt unseres Kopfes oder auch unseres Körpers geht, parallel einer bestimmten Richtung, wird das Objekt treffen.

Die Richtung, in der die Objekte des Sehfeldes liegen, wird im allgemeinen, abgesehen von den schon bisher besprochenen Täuschungen, bestimmt sein, sobald erstens die Richtung der Blicklinie und zweitens die Richtung irgend eines durch den Blickpunkt gehenden Meridians gegeben ist.

Die Richtung, in welcher der Blickpunkt liegt, wechselt mit der Stellung des Auges gegen den Kopf, beziehlich gegen den Körper; indessen sind wir im allgemeinen imstande, die jedesmalige Richtung der Blicklinie richtig zu beurteilen. Man hat die Empfindungen, auf denen die Wahrnehmung der durch Muskelwirkung veränderten Stellung der Teile unseres Körpers beruht, das Muskelgefühl genannt. Unter diesem Ausdruck sind aber mehrere wesentlich verschiedene Empfindungen voneinander zu trennen. Wir können nämlich wahrnehmen

1. die Intensität unserer Willensanstrengung, durch welche wir die Muskeln in Wirksamkeit zu setzen suchen*;
2. die Spannung der Muskeln, also die Kraft, mit der diese zu wirken streben;
3. den Erfolg der Anstrengung, der, abgesehen von seiner Wahrnehmung durch andere Sinnesorgane, namentlich Gesicht und Getast, am Muskel sich äußert durch wirklich eintretende Verkürzung, wobei auch an den Gliedern veränderte Spannung der sie bedeckenden Haut möglicherweise wahrgenommen werden kann.

Ich kann bei sehr ermüdeten Muskeln z. B. imstande sein, wahrzunehmen, daß ich den äußersten Grad von Willensanstrengung aufbiete, um die Muskeln in Spannung zu versetzen, daß aber deren Spannung nicht mehr genügend ist, den Erfolg zu erreichen. Andererseits kann ich bei kräftigen Muskeln durch eine mäßige Willensanstrengung eine deutlich fühlbare Spannung der Muskeln hervorbringen, ohne doch wegen irgend eines äußeren Widerstandes den Erfolg zu erreichen, den ich wünsche. Alle diese Fälle unterscheiden sich in meiner Wahrnehmung von dem Falle, wo ich den Erfolg wirklich erreiche, und wir müssen diese verschiedenen Umstände auch in der Theorie des Muskelgefühls unterscheiden.

Wir beschränken uns in der vorliegenden Untersuchung natürlich auf die beim Auge vorkommenden Verhältnisse.

Zunächst zeigen bekannte Erfahrungen, daß wir die Richtung unseres Blicks nicht nach der wirklich vorhandenen Stellung unseres Auges beurteilen, wenn dieselbe durch andere Kräfte als die unserer Muskeln verändert ist. Wenn man auf den von den Lidern bedeckten Teil des Augapfels drückt, oder die den Augapfel umgebende Haut zerrt, so werden dadurch kleine Änderungen in der Stellung des Augapfels selbst hervorgebracht. Am besten gelingt dies dadurch, daß man am äußeren Augenwinkel eine Hautfalte zusammenkneift und dann das Auge nach innen wendet, so daß die den Augapfel bedeckende Bindehaut an der äußeren Seite gespannt wird. Öffnet man beide Augen, indem man an der Hautfalte zerrt, so erhält man Doppelbilder, indem das Bild des

* Über diesen Punkt und die damit zusammenhängende vielumstrittene Frage der Innervationsgefühle vgl. die Bemerkungen im Anhangskapitel. K.

gezerrten Auges nach einer anderen Richtung hin verlegt wird, als das Bild des andern, und öffnet man nur das erstere Auge, so sieht man bei jedem Zuge an der Hautfalte eine Scheinbewegung der Gegenstände im Gesichtsfelde eintreten. Jeder gerade nach außen am rechten Auge gerichtete Zug läßt die Gegenstände scheinbar nach links hin weichen. Die Richtung der Gesichtslinie wird hierbei nach rechts hin verschoben; wir beurteilen aber die Lage der Gegenstände so, als wenn durch die Zerrung die Richtung der Gesichtslinie unverändert bliebe.

Dementsprechend zeigt sich, daß die Lage der Nachbilder, im geschlossenen Auge oder auf einen gleichmäßigen unbegrenzten Schirm projiziert, bei der Zerrung scheinbar unverändert bleibt, während diese Bilder wirklich mit dem Auge bewegt werden.

Dagegen läßt auch während einer solchen Zerrung jede durch die Muskeln hervorgebrachte Bewegung der Augen die scheinbare Lage der äußeren Gegenstände unverändert, während die Nachbilder sich scheinbar bewegen.

Wenn wir so durch einen äußerlichen Zug den Augapfel nach außen rollen, wird natürlich der innere gerade Muskel desselben um ebensoviel gedehnt und der äußere um ebensoviel kürzer, als wenn eine solche Rollung durch Muskelwirkung geschieht. Denn die Muskeln sind auch im ruhenden Zustande elastische Bänder, welche sich stets soweit verkürzen, als es die Lage ihrer Befestigungspunkte erlaubt.

Wir beurteilen also die Richtung unserer Gesichtslinie weder nach der wirklichen Stellung des Augapfels, noch nach der von ihm abhängigen wirklichen Verlängerung oder Verkürzung der Augenmuskeln.

Daß wir die Richtung der Gesichtslinie auch nicht nach der Spannung der Augenmuskeln beurteilen, geht daraus hervor, daß in solchen Fällen, wo Lähmungen einzelner Augenmuskeln plötzlich eingetreten sind, die Patienten, wenn sie ihr Auge nach einer Richtung zu bewegen streben, nach der sie es nicht mehr bewegen können, Scheinbewegungen sehen, die bei gleichzeitig geöffnetem anderen Auge Doppelbilder hervorbringen. Wenn also z. B. der äußere gerade Muskel des rechten Auges oder sein Nerv gelähmt ist, so kann das Auge nicht mehr nach der rechten Seite herübergezogen werden. So lange der Patient es nur nach der inneren Seite wendet, macht es noch regelmäßige Bewegungen, und er nimmt die Richtung der Objekte im Gesichtsfeld richtig wahr. Sobald er versucht es nach außen, also nach rechts hin zu wenden, folgt es seinem Willen nicht mehr, sondern bleibt in der Mitte stehen und die Objekte bewegen sich scheinbar nach rechts, obgleich die Stellung des Auges und der Netzhautbilder im Auge unverändert bleibt.

In einem solchen Falle eines gelähmten Muskels tritt infolge der Willensanstrengung weder Bewegung des Auges, noch Verkürzung der zu verkürzenden Muskeln, noch auch erhöhte Spannung in diesen Muskeln ein. Der Willensakt hat außerhalb des Nervensystems gar keine Folgen mehr und doch urteilen wir über die Richtung der Gesichtslinie so, als hätte der Wille die normalen Wirkungen ausgeübt; wir glauben, daß die Gesichtslinie sich in dem letztgenannten Falle nach rechts verschoben habe, und da die Lage der Netzhautbilder auf der Netzhaut des gelähmten Auges hierbei unverändert bleibt, erscheint uns das so, als machten die Objekte die irrtümlich vorausgesetzte Bewegung des Augapfels mit.

Ist die Lähmung nicht vollständig, so daß das Auge zwar noch ein nach außen liegendes Objekt fixieren kann, dazu aber einen größeren Aufwand von

Innervation des gelähmten Muskels bedarf, als im normalen Zustande, so tritt doch eine falsche Vorstellung von der Richtung der Gesichtslinie und von der Lage des Objektes ein, wie man dadurch erkennen kann, daß man den Patienten schnell nach dem Objekte greifen läßt. Er greift dann zuerst daneben[1].

Diese Erscheinungen lassen keinen Zweifel darüber, daß wir die Richtung der Gesichtslinie nur beurteilen nach der Willensanstrengung, mittels der wir die Stellung der Augen zu ändern suchen. Es gibt zwar auch gewisse schwache Empfindungen in unsern Augenlidern, wenn sich die Hornhaut unter ihnen verschiebt, welche uns über die wirkliche Stellung des Auges einigermaßen unterrichten könnten, und ferner fühlen wir bei angestrengten Seitenbewegungen der Augen eine ermüdende Spannung in den Muskeln, aber alle diese Empfindungen scheinen zu schwach und zu unbestimmt zu sein, als daß sie für die Wahrnehmung der Richtung verwertet werden könnten.

Wir wissen also, welche Willensimpulse und wie stark wir sie anzuwenden haben, um das Auge in eine bestimmte beabsichtigte Stellung zu versetzen. Da unter den gewöhnlichen normalen Umständen sich der Bewegung des Auges keine fremden Hindernisse entgegensetzen, so kann auch meistens aus der Stärke des Willensimpulses der Effekt genügend beurteilt werden, viel vollständiger wenigstens, als dies bei den Extremitäten und den meisten anderen beweglichen Teilen des Körpers möglich sein würde. Die einzige Wirkung des Willensimpulses, die wir am Auge direkt und hinreichend deutlich wahrnehmen, ist die veränderte Lagerung der Objekte im Sehfeld bei der neuen Stellung des Auges. Es läßt sich nun zeigen, daß wir in der Tat diese Veränderungen des Bildes fortdauernd als Kontrolle für das richtige Verhältnis der Willensimpulse zu ihrem Effekte benutzen.

Man setze sich zwei Glasprismen von 16—18° brechenden Winkels in ein Brillengestell zusammen, so daß die brechenden Winkel beider nach links gekehrt sind. Die Gegenstände des Gesichtsfeldes erscheinen durch diese Prismen alle nach links von ihrem wirklichen Orte abgelenkt. Man vermeide es zunächst, die Hand in das Gesichtsfeld zu bringen, betrachte sich irgend ein bestimmtes erreichbares Objekt genau, schließe dann die Augen und versuche mit geschlossenen Augen das Objekt mit dem Zeigefinger zu treffen; man wird natürlich links daneben vorbeifahren. Wenn man aber diese Versuche eine Weile fortgesetzt hat, oder noch schneller, wenn man die Hand in das Gesichtsfeld bringt und mit ihr kurze Zeit hindurch unter Leitung des Auges die Objekte betastet, so wird man finden, daß man bei Wiederholung des erst beschriebenen Versuchs nicht mehr vorbeifährt, sondern die Objekte richtig trifft; ebenso auch neue Objekte, die man an Stelle der schon bekannten bringt. Hat man dies erreicht und versucht man nun, nachdem man die Hand aus dem Gesichtsfelde entfernt, die Prismen weggenommen und irgend ein Objekt angeblickt hat, dies bei geschlossenen Augen zu greifen, so wird man finden, daß man jetzt mit der Hand rechts vorbeifährt, bis durch mehrere vergebliche Versuche die Beurteilung der Richtung, in der die Augen stehen, wieder berichtigt ist[2].

[1] A. v. Graefe im Archiv für Ophthalmologie, Bd. I. Abt. 1. S. 67. Anmerkung. — A. Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. 1861. S. 124—129. Alfred Graefe im Archiv für Ophthalmologie. XI, 2. S. 6—16.

[2] Der Versuch ist von Czermak im wesentlichen ähnlich angegeben in Wiener Berichte. XVII, 575—577.

Daß hierbei nicht etwa das Muskelgefühl der Hand und die Beurteilung von deren Ort, sondern die Beurteilung der Blickrichtung gefälscht wird, ergibt sich daraus, daß, wenn man, durch die Prismen blickend, sich gewöhnt hat, mit der rechten Hand die gesehenen Objekte zu treffen, und man die mit der rechten Hand berührten Objekte nun bei geschlossenen Augen mit der linken, vorher gar nicht benutzten und nicht im Gesichtsfelde gewesenen Hand zu treffen sucht, man sie ganz sicher und richtig trifft. Man bestimmt also in einem solchen Falle durch das Tastgefühl den Ort vollkommen richtig und weiß ihn nach dieser Angabe durch ein anderes tastendes Organ sicher zu finden.

Daß vierteljährige Kinder erst sehr langsam lernen ihre Hände nach Gesichtsobjekten hin zu dirigieren, wenn sie schon sehr gut wissen, sie nach dem Munde oder nach einer juckenden Hautstelle, also mittels Tastempfindungen, zu lenken, lehrt die Erfahrung. Wie also hier die Übereinstimmung zwischen Augenbewegungen und Handbewegungen erst durch Versuche gelernt wird, so muß ihre Genauigkeit auch bei Erwachsenen durch immer erneute Versuche und Beobachtungen fortwährend kontrolliert werden.

Ich habe schon früher angeführt, daß die Übereinstimmung der Bewegungen beider Augen in ähnlicher Weise gestört werden kann, wenn man durch ein Prisma das Bild des einen Sehfeldes allmählich in die Höhe schiebt; dann folgt das betreffende Auge, und beide Augen fahren fort einfach zu sehen, während das eine etwas mehr nach oben gerichtet ist als das andere. Auch hier kommt es schnell zur Gewöhnung, diese Stellung als die normale Fixationsstellung zu benutzen; und wenn man die Prismen fortnimmt, fährt man fort in derselben Weise zu fixieren, wobei man übereinander stehende Doppelbilder der Objekte erhält, die sich erst bei einer Änderung der Augenstellung schnell wieder vereinigen. Es zeigt sich hierbei, daß auch die übereinstimmende Stellung beider Augen nach dem Erfolg geregelt wird, indem man sich gewöhnt, solche Willensimpulse zu geben, welche geeignet sind, unter den obwaltenden Umständen beide Fixationspunkte auf dasselbe Objekt zu richten.

Es gehört hierher ferner die Erfahrung, daß, wenn man bewegte Objekte längere Zeit zu fixieren bemüht gewesen ist, nachher ruhende Objekte in der entgegengesetzten Richtung bewegt erscheinen. Man bezeichnet das Sehen dieser Scheinbewegungen als Schwindel. Wenn man zum Beispiel in einem Eisenbahnzug reist und eine Weile nach den draußen dicht an der Bahn befindlichen Gegenständen geblickt hat, dann aber den Blick auf den Fußboden des Wagens wirft, so scheint dieser, der sich zum Körper des Reisenden in relativer Ruhe befindet, in Richtung des Zuges von ihm fort zu fliehen.

Es erklärt sich dies daraus, daß die Gegenstände an der Bahn eine scheinbare, der des Zuges entgegengesetzte Bewegung haben. So oft der Reisende einen derselben zu fixieren sucht, muß er seine Augen schnell der Richtung des Zuges entgegen bewegen. Nachdem er sich gewöhnt hat, die unter diesen Umständen ausgeübten Willensimpulse als die für die Fixation eines Objekts geeigneten zu betrachten, versucht er in derselben Weise auch ruhende Objekte zu fixieren. Die genannten Willensimpulse bringen aber Bewegungen der Augen hervor, und da der Beobachter seine Augen für festgestellt hält, so scheinen sich ihm nun die Objekte und zwar der vorher angeschauten objektiven Bewegung entgegengesetzt zu bewegen.

Wenn man dagegen, während man aus dem Wagen blickt, etwa ein Pünktchen in der Fensterscheibe dauernd fixiert, so kommt der beschriebene

Gesichtsschwindel nicht zustande, obgleich man wie vorher bewegte Objekte hat vorbeifliegen sehen, aber ohne die zu ihrer Fixation nötigen Bewegungen zu machen. Bei ganz fester Fixation eines zum Auge relativ ruhenden Punktes verwischen sich übrigens auch die Bilder der bewegten Objekte vollständig bei der für diese Täuschung nötigen Geschwindigkeit. Man kann diese nur erkennen, wenn man ihnen kurze Strecken mit den Augen folgt. Die dazu nötigen Augenbewegungen bleiben meist unbewußt, und sie sind deshalb von Plateau [1] und Oppel [2], welche über diese Erscheinungen Beobachtungen angestellt haben, nicht bemerkt worden. Daß aber solche Augenbewegungen vorhanden sind, folgt aus dem Umstand, daß bei absolut fester Fixation die bewegten Bilder sich verwischen.*

Dasselbe beobachtet man bei dem Drehschwindel, wenn man sich mit offenen Augen eine Weile um seine eigene Längsachse gedreht hat. Sowie man anhält, scheinen die Objekte sich noch eine Zeitlang in der Richtung fortzubewegen, in der man sich gedreht hat. Ich finde, daß nach einer Drehung mit geschlossenen Augen diese Art der Scheinbewegung nicht eintritt, sobald man die Augen erst öffnet, wenn man wirklich bis zum festen Stehen gekommen ist. Tut man es früher, so tritt eine Scheinbewegung der Gegenstände entgegengesetzt der bisherigen Drehung des Körpers ein; aber man überzeugt sich auch leicht, daß der Körper auf den Füßen noch etwa eine Viertelkreisdrehung ausführt, ehe er wirklich zur Ruhe kommt, zu einer Zeit, wo man ihn schon für ruhend hält. Dann ist also eine Täuschung über die Haltung des Körpers Ursache der Scheinbewegung der Objekte. Zuweilen kommt übrigens auch diese der objektiven Drehung des Körpers entgegengesetzte Schwindelbewegung nach der Drehung mit offenen Augen zum Vorschein, wie denn überhaupt dieser Versuch nicht so rein ist wie die anderen, bei denen der Körper des Beobachters nicht mitbewegt wird.**

Es kommen auch solche Arten von Gesichtsschwindel vor, wo verschiedene Teile des bewegten Körpers verschieden gerichtete Bewegung gehabt haben. Wenn man z. B. die in Fig. 53, S. 217 (Bd. II) dargestellte Scheibe mit der Spirale rotieren läßt, so scheint die Spirale, je nach der Richtung ihrer Drehung, sich entweder fortdauernd auszudehnen oder zusammenzuziehen. Hält man die Scheibe plötzlich an, so scheint sie nachher sich einen Augenblick zusammenzuziehen, wenn sie sich vorher ausdehnte, oder auszudehnen, wenn sie sich vorher zusammenzog. Und auch andere Objekte, z. B. ein bedrucktes Blatt Papier, was man unmittelbar nach der Spirale betrachtet, zeigen eine solche Kontraktions- oder Dilatationsbewegung.

Viel weniger deutlich ist eine ähnliche Schwindelbewegung, die sich nach Anblick einer rotierenden sternförmigen Figur einstellt, und wobei der objektiv ruhende Körper, den man betrachtet, sich ein wenig in entgegengesetzter Richtung zu drehen scheint, als der Stern.

[1] Plateau in Poggendorffs Annalen. LXXX. 287. — *Bull. de Bruxelles.* XVI.
[2] Oppel, ebenda. XCIX. 543.

* Die Anschauungen über die hier besprochenen Bewegungsnachbilder haben sich, im Anschluß an wesentlich andere Vorstellungen hinsichtlich der Wahrnehmung von Bewegungen stark modifiziert. Vgl. darüber Anm. 1 am Schlusse des Paragraphen. K.

** Die neueren Erfahrungen über das statische Organ und die von ihm ausgelösten Empfindungen haben auch in Beziehung auf die hier erwähnten Schwindelerscheinungen zu abweichenden Anschauungen geführt. Vgl. darüber Anm. 2 am Schlusse des Paragraphen. K.

Am deutlichsten werden diese letzteren Scheinbewegungen, wenn man den Blick nach dem ruhenden Mittelpunkte der Achse richtet, dabei aber im indirekten Sehen auf die bewegte Figur achtet, welche nicht so schnell rotieren darf, daß man ihre einzelnen Züge nicht mehr wahrzunehmen imstande wäre, aber auch nicht so langsam, daß man sie ganz ohne Schwierigkeit wahrnimmt. Wenn man ganz scharf den Mittelpunkt der Achse fixiert und nur auf diesen achtet, so hat man allerdings auf den Seitenteilen der Netzhaut ebenso, wie vorher die bewegte Figur, aber die Schwindelbewegung tritt nicht ein. Es scheint mir daraus hervorzugehen, daß bei diesem Achten auf die bewegte Figur leise Augenbewegungen im Spiele sind, wahrscheinlich kreisförmige Bewegungen, deren Richtung immer auf denjenigen Teil des Sehfeldes hinzielt, auf den die Aufmerksamkeit des indirekten Sehens gerade gerichtet ist. In der Tat würde ohne solche Bewegungen, die der bewegten Figur nachfolgen, die letztere nicht ganz so deutlich erscheinen können, als sie es bei derjenigen Art des Anblickens tut, die den Schwindel entwickelt. Wenn dieselbe Art des Blickens nachher auf einen ruhenden Gegenstand angewendet wird, muß dieser natürlich eine entgegengesetzte Scheinbewegung zeigen.

Solange wir eine große Zahl ruhender Gesichtsobjekte vor uns haben, ist es leicht, an diesen fortdauernd sich über den Grad der Innervation zu vergewissern, der nötig ist, um das Auge in bestimmten Stellungen festzuhalten. Wenn man dagegen überwiegend bewegte Massen vor sich hat, ist es schwer, das Urteil über Ruhe und Bewegung richtig zu erhalten. Wenn man auf einem Balken über einen schnell fließenden Bach gehen will, muß man vermeiden nach dem Wasser zu sehen, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren. Wenn man auf einem der unteren Gerüste des Schlosses Laufen an den Rheinfall herantritt und nichts vor sich sieht als die stürzende Wassermasse, so entsteht eine Neigung hintenüber zu fallen. Eben deshalb wird man auf Schiffen so verwirrt in der Orientierung; man fühlt den Zug der Schwere scheinbar bald nach rechts, bald nach links, bald nach vorn oder nach hinten gehend, weil man die Richtung der Vertikale nicht mehr zu finden weiß. Nach längerer Gewöhnung erst lernt man, wie ich an mir selbst erfahren habe, die Schwerkraft als Orientierungsmittel brauchen, und dann hört auch der Schwindel auf. Dem Neuling scheint in der Kajüte eines Schiffs das in Cardanischer Aufhängung befestigte Barometer hin und her zu schwanken, welches in Wirklichkeit immer senkrecht hängt, die Kajüte dagegen festzustehen, während ihn selbst die Schwerkraft bald hier-, bald dorthin zerrt. Sobald man den Schwindel verloren hat, sieht man das Barometer feststehen und die Kajüte schwanken. Wie sehr aber hierbei die Sicherheit der Innervation der Augenmuskeln zeitweilig leidet, zeigt sich daran, daß Passagiere, die seekrank waren, sogar nachher am Lande, bei jeder schnellen Bewegung der Augen die Wände des Zimmers, in dem sie sich befinden, scheinbar dieselben Bewegungen ausführen sehen, welche die Kajüte des Schiffs zu machen pflegte.

Alle diese Erscheinungen lassen deutlich erkennen, daß eine fortdauernde Kontrolle der für die Augenstellungen und Augenbewegungen notwendigen Innervationsstärke durch die Beobachtung ihres Erfolgs an den Gesichtsbildern stattfinden muß, wenn richtige Urteile über die Richtung der Gesichtslinie und der fixierten Gegenstände gefällt werden sollen.*

---

* Vgl. hierüber Anm. 3 am Schlusse des Paragraphen. K.

Eine andere Art von Täuschung, die hierher gehört, hat F. ZÖLLNER[1] beschrieben. Man zeichne auf ein Blatt Papier einen Kreis und schneide in ein anderes dunkles und steifes Blatt einen Schlitz, der länger ist als der Durchmesser des Kreises und dessen Breite $^1/_{10}$ bis $^3/_{10}$ dieses Durchmessers beträgt. Man halte das Blatt mit dem Schlitz fest und schiebe unter ihm das Blatt mit dem Kreise hin und her, so daß der Kreis selbst hinter dem Schlitz sich vollständig vorbeischiebt, bald in der einen, bald in der anderen Richtung. Unter diesen Umständen erscheint der Kreis wie eine Ellipse, deren größere Achse senkrecht zur Richtung der Bewegung gestellt ist. Der Grund davon ist darin zu suchen, daß der Beobachter, indem er die bewegte Figur zu sehen sich bestrebt, unwillkürlich und ohne es deutlich zu wissen, ihr mit den Augen folgt, aber mit geringerer Geschwindigkeit. Dadurch entstehen nacheinander auf den verschiedenen Streifen der Netzhaut, auf denen der Spalt während dieser Bewegung sich abbildet, Eindrücke von dem gerade vorliegenden Stücke des Kreises gerade wie bei dem Anorthoskop, nur daß bei diesem der Spalt selbst bewegt, das Auge ruhig ist, während hier das Auge bewegt ist und der Spalt stillsteht. Der optische Eindruck ist hierbei derselbe, als ob der Spalt sich in entgegengesetzter Richtung wie das Auge bewegte, also auch entgegengesetzt dem bewegten Bilde, und dies gibt im Anorthoskop, wie Bd. II, S. 187—189 auseinandergesetzt ist, eine scheinbare Verkürzung der Figur nach der Richtung der Bewegung.

Daß Augenbewegungen der Grund dieser Täuschung sind, kann man daraus erkennen, daß man bei der Geschwindigkeit, welche die Täuschung am besten zeigt, überhaupt nichts mehr von der Figur erkennen kann, sobald man ganz fest einen Punkt am Rande des Spalts fixiert. Um die Figur erkennen zu können, muß man ihr eben mit dem Auge folgen. Außerdem kann ein zweiter Beobachter auch solche Augenbewegungen bemerken, wie ZÖLLNER gefunden hat.

Wenn man den Kreis sehr langsam hinter dem Spalte vorbeizieht, so erscheint er im Gegenteil in Richtung der Bewegung verlängert zu sein. Das mag davon herrühren, daß die Teile der Begrenzungslinie, welche im Spalte erscheinen, wegen der scheinbaren Vergrößerung der spitzen Winkel steiler gegen die Seiten des Spaltes zu stehen scheinen, als sie wirklich sind. Dasselbe würde aber in Wirklichkeit der Fall sein, wenn eine quer verlängerte Ellipse hinter dem Spalt vorbeigezogen würde, daher der Beobachter denn die Figur als eine solche Ellipse deutet.

Nachdem wir uns durch die vorher beschriebenen Tatsachen überzeugt haben, daß die Übereinstimmung zwischen den Wahrnehmungen durch das Gesicht und denen des Tastsinns auch beim ausgebildeten Auge eines Erwachsenen dauernd nur durch die fortlaufende Vergleichung mit der Erfahrung erhalten wird, erledigt sich die so übermäßig viel verhandelte Frage über den Grund, warum wir die Gesichtsobjekte aufrecht sehen trotz des verkehrten Netzhautbildes, ganz von selbst. Der Tastsinn an und für sich ist fähig, vollständige Raumanschauungen auszubilden, selbst ohne alle Hilfe durch den Gesichtssinn; wir wissen dies durch die Erfahrungen an blindgeborenen Personen. Ja, die Richtung der Schwere, welche das Oben und Unten bestimmt, wird sogar ausschließlich durch den Tastsinn und nicht durch den Gesichtssinn

---

[1] Über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. POGGENDORFFS Annalen. 1862.

unmittelbar wahrgenommen. Daß die Gesichtsempfindungen an und für sich, ohne alle vorausgängige Erfahrung Vorstellungen von einer bestimmten Richtung des Gesehenen hervorrufen sollen, ist eine, wie mir scheint, vollkommen unnötige Hypothese, und noch weniger begründet ist vom Standpunkte der empiristischen Ansicht aus die Voraussetzung, daß die Vorstellung der Richtung hierbei sogar beeinflußt sein soll durch den Ort, wo sich das Bild auf der Netzhaut befindet, daß ein unten abgebildeter Punkt auch deshalb unten erscheinen müßte, während doch das natürliche Bewußtsein nicht einmal von der Existenz einer Netzhaut oder optischer Bilder auf ihr, geschweige denn von der Lage derselben etwas weiß.

In der nativistischen Theorie der Sinneswahrnehmungen, wo man voraussetzt, daß die Nervenreizung auch unmittelbar und unabhängig von aller Erfahrung die Vorstellung eines gewissen Orts des wahrgenommenen Objekts hervorbringen soll, muß allerdings vorausgesetzt werden, daß die angeborenen Lokalisationen durch das Gesicht in einer gewissen angeborenen Übereinstimmung mit denen durch den Tastsinn sich befinden, sei es nun, daß man sich denkt, die Sehnervenfasern, welche von den unteren Seiten der Netzhäute kommen, wendeten sich im Gehirn nach oben, und es entstände dort ein richtig gestelltes Bild der Objekte, was die Seele anschaute, oder daß man das Anschauen in den Netzhäuten vor sich gehen läßt und die Tastwahrnehmungen entsprechend den auch verkehrt gesehenen eigenen Händen und Beinen des Beobachters ebenfalls verkehrt in dieses Anschauungsbild eintragen läßt, wo dann also alle unsere Raumvorstellung verkehrt sein und bleiben würde. Es ist hier natürlich der weiteste Spielraum für die wildesten Hypothesen eröffnet.

Ich meine, daß eine angeborene Übereinstimmung der Lokalisationen durch den Gesichtssinn und Tastsinn den Erfahrungen gegenüber, welche die Wirksamkeit der fortdauernden Kontrolle für die richtigen Beziehungen beider Sinne aufeinander durch die Erfahrung beweisen, nicht festgehalten werden kann, weil man sonst in die Schwierigkeit kommt, daß die angeblich angeborene und durch unmittelbare Empfindung gegebene Übereinstimmung jeden Augenblick durch Erfahrung, also durch Urteilsakte so verändert und überwältigt werden kann, daß von dieser hypothetischen Empfindung sich gar nichts mehr merklich macht.

Meines Erachtens hat der Streit über den Grund des Aufrechtsehens nur das psychologische Interesse zu zeigen, wie schwer selbst Männer von bedeutender wissenschaftlicher Befähigung sich dazu verstehen, das subjektive Moment in unseren Sinneswahrnehmungen wirklich und wesentlich anzuerkennen und in ihnen Wirkungen der Objekte zu sehen, statt unveränderter Abbilder (*sit venia verbo*) der Objekte, welcher letztere Begriff offenbar sich selbst widerspricht.

Wir haben bisher nur untersucht, in welchen Richtungen wir weit entfernte Objekte zu sehen glauben; es bleibt noch übrig, das Zentrum zu bestimmen, auf welches diese Richtungslinien bezogen werden, was namentlich für die Beurteilung der Richtung naher Objekte nicht gleichgültig ist. Gewöhnlich ist früher die Annahme gemacht worden, daß jedes Auge die gesehenen Gegenstände in Richtung der in Bd. I, S. 77 definierten Richtungslinien nach außen setze, wonach dann die Richtungen, in denen nahe Gegenstände gesehen werden, im allgemeinen für beide Augen verschieden sein würden. In dieser Beziehung hat aber neuerdings E. Hering auf eine merkwürdige Täuschung aufmerksam gemacht, vermöge deren wir die Richtung der gesehenen Gegenstände so wahr-

nehmen, als ob beide Augen in der Mittelebene des Kopfes ständen und auf ihren gemeinsamen Fixationspunkt gerichtet wären.

Es mögen im Anfang beide Augen A und B, Fig. 48, hinausblicken in parallelen Richtungen Aa und Bb, das Auge B aber möge dann geschlossen werden, während A noch immer das unendlich weit entfernte Objekt a fixiert und die Richtungen beider Augen also unverändert bleiben. Man sieht a unter diesen Umständen in richtiger Richtung. Jetzt akkommodiere man A für einen viel näher gelegenen Punkt f der Linie Aa, wobei also die Lage des Auges A und seiner Gesichtslinie Aa, sowie der Ort des Netzhautbildes von a auf der Netzhaut des Auges A, ganz unverändert bleiben und das Netzhautbildchen nur etwas weniger scharf begrenzt wird. Der Erfolg ist, daß eine Scheinbewegung des Objekts a eintritt, wodurch es etwa in der Richtung Ac hinüberrückt. Sowie man wieder für unendliche Ferne akkommodiert, weicht a scheinbar an seinen ersten Platz zurück.

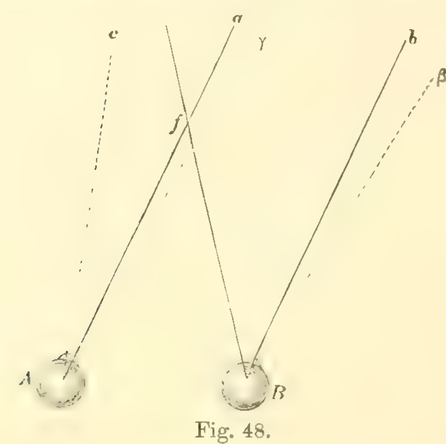


Fig. 48.

Nun verändert sich bei diesem Versuche durchaus nicht die Richtung der Gesichtslinie Aa, wenigstens nicht um eine bemerkbare und in Betracht kommende Größe, sondern nur die Stellung des verschlossenen Auges B verändert sich, weil bei dem Streben, für den Punkt f zu akkommodieren, sich gleichzeitig auch die andere Gesichtslinie auf f hinrichtet. Die Gesichtslinie des Auges B kommt also, während f fixiert wird, in die Richtung Bf.

Umgekehrt ist es mir möglich, meine Gesichtslinien etwas divergent zu machen auch bei geschlossenen Augen, so daß das Auge B in der Richtung $B\beta$ blickt. Diese Divergenz kann ich nur langsam erreichen und sehe deshalb keine deutliche Scheinbewegung. Dagegen tritt eine solche ein, wenn ich mit der Anstrengung für die Divergenz plötzlich nachlasse und nun die Gesichtslinien in parallele Stellung zurückspringen. Dabei sehe ich dann das Objekt a etwa aus der Stellung γ nach a zurückweichen.

Es hat also nicht nur die Stellung des sehenden Auges A, sondern auch die des geschlossenen Auges B Einfluß auf unsere Beurteilung der Richtung, in der der fixierte Gegenstand liegt. Wenn das geöffnete Auge unbeweglich stehen bleibt, das geschlossene Auge sich aber nach rechts oder links bewegt, bewegt sich scheinbar auch der vom geöffneten Auge fixierte Gegenstand nach rechts oder links.

Für meine beiden Augen ist die Größe dieser Scheinbewegung ziemlich verschieden; sie ist gering, wenn das rechte geöffnet ist und fixiert, viel größer, wenn das linke geöffnet, das rechte geschlossen ist. Die Richtung der Gesichtslinie wird also nach den Innervationen, welche auf beide Augen gleichzeitig ausgeübt werden, bestimmt und nicht allein nach der des geöffneten Auges. Dabei dürfen wir wohl vermuten, daß die scheinbare Richtung der Gesichtslinie im allgemeinen der mittleren Richtung der Gesichtslinien beider Augen entspricht, wobei aber bei Leuten, die gewöhnt sind, beim Mikroskopieren und Teleskopieren ein Auge vorzugsweise zu gebrauchen, die scheinbare Richtung

sich der wahren Richtung der Gesichtslinie des bevorzugten Auges mehr annähert, als der des anderen Auges. Genauere Aufschlüsse über die scheinbare gleichzeitige Richtung beider Gesichtslinien werden wir später durch das Phänomen der Doppelbilder erhalten.

Ich habe nun gefunden, daß auch für die scheinbare Lage des Netzhauthorizonts eine ähnliche Abhängigkeit von den Raddrehungen beider Augen besteht, wie für die scheinbare Richtung der Gesichtslinie.

Die darauf bezüglichen Versuche gelangen mir selbst am einfachsten in folgender Weise. Ich spannte über das eine Ende einer zylindrischen Röhre von etwa einem Fuß Länge einen schwarzen Faden als Durchmesser aus, nahm das andere Ende der Röhre vor ein Auge, während das zweite Auge geschlossen war, hielt vor das entferntere Ende der Röhre ein weißes Blatt Papier, so daß ich nichts von den Gegenständen des Zimmers sah, und suchte nun den schwarzen Faden durch Drehung der Röhre um ihre Längsachse möglichst genau horizontal oder vertikal zu stellen, und zwar mit parallel gerichteten Blicklinien, eine Bedingung, die ich auch bei verschlossenem zweiten Auge zu erfüllen gelernt habe. Wenn ich dann das weiße Papier von dem vorderen Ende der Röhre wegzog, konnte ich die Richtung, welche ich dem Faden gegeben hatte, mit der Richtung verschiedener objektiver horizontaler und vertikaler Linien vergleichen, die sich im Zimmer vorfanden. Ich setzte mich bei diesen Versuchen fest auf einen Lehnstuhl und bog den Kopf bald vornüber, bald hintenüber, oder hielt ihn vertikal, während die Röhre immer horizontal gehalten, dabei aber bald geradeaus, bald nach rechts, bald nach links gerichtet wurde, so daß sich dabei die Blicklinie nacheinander in alle möglichen Lagen gegen den Kopf einstellte.

Es zeigte sich, daß ich in allen diesen Stellungen, soweit das Auge sich ohne fühlbaren Zwang bewegen konnte, bei parallelen Blickrichtungen die horizontal erscheinende Linie wirklich horizontal stellte und die vertikal scheinende nur um einen solchen Winkel von der wirklich vertikalen abweichen ließ, wie der scheinbar vertikale Meridian des betreffenden Auges vom wirklich vertikalen abweicht.

Es geht also namentlich aus diesen Versuchen hervor, daß keineswegs in jeder Stellung des Auges der ursprünglich horizontale Meridian, den wir Netzhauthorizont genannt haben, immer für horizontal und der darauf senkrechte für vertikal gehalten wird.[1] Im Gegenteil bei seitlich und stirnwärts oder wangenwärts gerichtetem Blick kann der Netzhauthorizont Winkel bis zu zehn Graden mit der Horizontalebene machen, und doch wird auch dann eine wirklich horizontale und in der horizontalen Visierebene liegende Linie für horizontal gehalten.

Anders gestaltet sich die Sache, wenn man die Augen konvergieren läßt. Man schaue bei hintenüber gebogenem Kopfe durch das horizontal geradeaus gerichtete Rohr und richte den Faden bei parallelen Gesichtslinien horizontal. Prüft man seine Richtung, so findet man ihn dann, wie gesagt, wirklich horizontal. Jetzt fixiere man einen Punkt des Fadens selbst, oder akkommodiere möglichst für die Nähe, während die Richtung des Blicks unverändert bleibt. Sogleich erleidet der Faden eine sehr auffallende scheinbare Drehung, und zwar in dem Sinne, wie sich der Netzhauthorizont des anderen Auges des Beobachters dreht, indem dieses Auge aus der Parallelstellung in die Konvergenzstellung

[1] Herr E. Hering hat die Regel in dieser Form aufgestellt (Beiträge zur Physiologie S. 254), aber er hat nicht in parallelen Augenstellungen experimentiert und nicht in solchen Blickrichtungen, wo sich die Abweichung hätte zeigen können, da sein Fixationspunkt immer in der Medianebene lag.

übergeht. Blickt man also z. B. bei hintenüber gebogenem Kopfe mit dem rechten Auge horizontal geradeaus, so senkt sich bei eintretender Konvergenz das rechte Ende des Fadens scheinbar, während sich das linke hebt. Bei vornübergebogenem Kopfe ist es umgekehrt. Umgekehrt auch für das linke Auge. Soll der Faden bei konvergenten Augen horizontal erscheinen, so muß die Röhre um einige Grade im entgegengesetzten Sinne seiner scheinbaren Ablenkung gedreht werden, worauf er bei wiederhergestellten parallelen Blickrichtungen nicht mehr horizontal erscheint. Die hierbei anzuwendenden Drehungen der Röhre sind viel bedeutender, als die außerordentlich kleinen wirklichen Drehungen meines beobachtenden Auges bei eintretender Konvergenz des anderen (siehe dies. Bd. S. 45) und können durch diese nicht erklärt werden.[1]

Wir haben hier vielmehr eine Erscheinung gleicher Art, wie bei der Beurteilung der Richtung der gesehenen Gegenstände. Trotz der unveränderten Haltung des sehenden Auges bringt die veränderte Richtung und Drehung des nicht sehenden ein verändertes Urteil über die Richtungen der horizontalen und vertikalen Linien hervor.

Da nicht alle Beobachter die Fähigkeit haben, willkürlich ohne entsprechenden Fixationspunkt ihre Augen parallel oder konvergent zu stellen, habe ich die Methode für parallele Gesichtslinien noch in folgender Weise abgeändert. Vor einer breiten einförmig angestrichenen grauen Wand wurde ein langer schwarzer Faden mit einem kleinen Gewichte vertikal aufgehängt. An dem Gewichte waren rechts und links noch horizontale Fäden befestigt, die durch Ringe gingen. Einer dieser Fäden wurde durch ein kleines Gewicht gespannt gehalten, der andere war zum Beobachter hingeleitet, der etwa sechs Fuß von dem vertikalen Faden entfernt saß, und je nachdem der Beobachter diesen Faden anzog oder nachließ, wurde der vertikale Faden etwas nach rechts oder links von der Vertikallinie abgelenkt. Der Beobachter blickte durch eine zylindrische, horizontal gehaltene Röhre nach dem vertikalen Faden, so daß er keine anderen vertikalen oder horizontalen Linien im Gesichtsfelde hatte, und suchte jenen Faden genau vertikal zu stellen. Das untere Ende des vertikalen Fadens bewegte sich vor einer kleinen Skale, an der seine Ablenkung abgelesen werden konnte.

Nach dieser Methode hat Herr Dr. Dastich im hiesigen physiologischen Laboratorium Versuche angestellt. Sein linkes Auge, welches normalsichtig war, wurde hauptsächlich gebraucht, da das rechte kurzsichtig ist. Um den Faden vertikal zu sehen, stellte er das untere Ende desselben stets etwas nach rechts, entsprechend dem Sinne der Abweichung des scheinbar vertikalen vom wirklich vertikalen Meridian. Die Abweichung von der Vertikale betrug:

Linkes Auge.

Kopf senkrecht, geradeaus sehend	1° 52′
nach rechts sehend	2° 4′
nach links sehend	1° 49′
Kopf vorgebeugt, geradeaus sehend	1° 37′
rechts oder links sehend	2° 22′
Kopf zurückgebeugt, geradeaus sehend	1° 37′
rechts oder links sehend	2° 7′

[1] Messungsreihen über die Größe dieser Winkel konnte ich nicht machen, weil oft wiederholte starke Akkommodationsanstrengungen mir bald heftiges Kopfweh machen.

Rechtes Auge.

Kopf senkrecht, geradeaus sehend . . . . — 0° 42′.

Die Schrägstellungen waren alle so weit von der Primärstellung entfernt, als es ohne fühlbare Anstrengung der Augenmuskeln anging. Zwischen den nach unten rechts und nach unten links gekehrten Blickrichtungen hätte sich ein Unterschied von etwa 16° zeigen müssen, wenn immer derselbe Meridian des Auges der vertikalen Richtung entspräche; statt dessen war der Unterschied unmerklich klein. Ebenso bei den nach oben rechts und oben links gekehrten Blickrichtungen. Die kleinen Unterschiede, welche sich überhaupt zwischen den Winkeln des linken Auges hier zeigen, mögen von kleinen Unregelmäßigkeiten der Augenbewegung herrühren, vielleicht auch von dem Umstande, daß die Blickrichtungen zwar nahehin, aber doch nicht absolut parallel waren. Nach brieflichen Mitteilungen sind die Linien, welche Herr A. Volkmann als senkrecht einstellt bei parallelen Gesichtslinien weder immer absolut senkrecht, noch mit dem vertikalen Meridiane übereinstimmend, sondern scheinen etwa mitten zwischen der Richtung einer absolut vertikalen Ebene und der des vertikalen Meridians des Auges zu liegen. Herr Volkmann ist kurzsichtiger als Herr Dastich und ich selbst, und es könnte diese Abweichung vielleicht davon herrühren, daß kurzsichtige Augen überhaupt bei parallelen Blicklinien nicht genau genug sehen, um eine sichere Einübung zu gewinnen.

Die Differenz, welche durch die Konvergenzstellungen entsteht, kann man bei diesen Versuchen dadurch nachweisen, daß man erst den entfernten langen Faden senkrecht einstellt, dann bei derselben Kopfhaltung den in der Röhre ausgespannten Faden, diesen fortdauernd fixierend, und endlich die Stellung beider Fäden vergleicht.

Wenn man endlich mit konvergentem Blicke einen Punkt in der Medianebene des Kopfes fixiert, so werden, wie Hering[1] gefunden hat, Linien für horizontal gehalten, welche der Lage des Netzhauthorizonts des betreffenden Auges entsprechen. Er steckte zu dem Ende zwei Zylinder vom Durchmesser des Gesichts ineinander, deren Länge etwa 5—6 Zoll betrug. Über das vordere Ende eines dieser Zylinder war ein Faden gespannt, dessen Mitte fixiert wurde und der durch Drehung des Zylinders scheinbar horizontal gestellt werden konnte. Die Einstellung wurde 10—20 mal wiederholt und dann das Mittel genommen.

Die beschriebenen Tatsachen zeigen, daß in bezug auf die Raddrehungen ein ähnlicher Einfluß beider Augen besteht, wie in bezug auf die Beurteilung der Richtungen, und es scheint, daß man die bisher vorliegenden Tatsachen (die allerdings noch genaueren Messungen unterzogen werden müssen) unter folgende Regel anschaulich vereinigen kann, welche eine Erweiterung des von Hering für die Richtungen des Sehens aufgestellten Prinzips sein würde.

Man denke sich in der Mitte zwischen beiden Augen ein imaginäres mittleres Zyklopenauge, welches auf den gemeinsamen Fixationspunkt beider Augen gerichtet ist, und dessen Raddrehungen nach demselben Gesetze erfolgen

---

[1] Beiträge zur Physiologie S. 254—256. Die Polemik, welche Herr Hering, auf diesen Versuch gestützt, gegen mein Prinzip der leichtesten Orientierung geführt hat, und ebenso die Begründung seines dagegen aufgestellten Prinzips der vermiedenen Scheinbewegung fällt aber zu Boden, weil das Resultat dieses Versuchs mit seinen Angaben nur übereinstimmt, wenn der Fixationspunkt in der Medianebene liegt.

wie die der beiden wirklichen Augen. Man denke sich die Netzhautbilder aus einem der wirklichen Augen in dieses imaginäre Auge übertragen, so daß Blickpunkt auf Blickpunkt und Netzhauthorizont auf Netzhauthorizont fällt. Dann werden die Punkte des Netzhautbildes nach außen projiziert in der Richtungslinie des imaginären Zyklopenauges[1].

Stellen wir also z. B. unser rechtes Auge fest, lassen aber das linke aus paralleler in konvergente Stellung übergehen, also sich nach rechts bewegen, wobei es im allgemeinen auch eine Raddrehung machen wird, so müßte sich auch das Zyklopenauge um einen etwa halb so großen Winkel nach rechts drehen und eine etwa halb so große Raddrehung machen. Die Folge davon ist, daß die Gesichtsbilder des rechten ruhenden Auges scheinbar um denselben Winkel verschoben und gedreht werden, wie das Zyklopenauge.

Solange der Fixationspunkt in der Medianebene liegt, erleidet das Zyklopenauge keine Raddrehung, und dementsprechend erscheinen für alle diese Stellungen die Netzhauthorizonte horizontal.

Um die Erklärung dieses sonderbaren Verhaltens zu geben, müssen wir uns erinnern, daß unser natürliches Sehen binokular ist, und daß wir unmittelbar aus der Erfahrung nur lernen die Lagenverhältnisse von Körpern, die wir fixieren, zu beurteilen in Beziehung auf die Lage unseres eigenen Körpers, den wir fühlen. Rechts für uns ist ein Körper, der rechts von der Mittelebene unseres Körpers liegt, der aber, wenn er dieser näher als unser rechtes Auge ist, mit schwacher Linkswendung des rechten Auges bei starker Rechtswendung des linken gesehen werden kann. Wir gehen nicht darauf aus, die Richtung der Objekte gegen jedes einzelne unserer Augen, nicht einmal gegen unseren Kopf, sondern vielmehr gegen unseren Rumpf, als den Träger unserer Bewegungsorgane zu beurteilen. Auf die letztere Beziehung kommt es in praktischer Beziehung wesentlich an.

Das sinnliche Zeichen für ein rechts gelegenes Objekt ist also nicht, daß eines oder beide Augen bei seiner Fixation nach rechts gewendet sind, sondern nur, daß ihre mittlere Richtung nach rechts gewendet ist. Die Eindrücke der einzelnen Augen voneinander zu sondern, sind wir auch nur in wenigen Fällen geübt, nämlich in denen, wo es praktische Wichtigkeit hat, wie beim zweiäugigen Sehen von Körpern. Daher sind wir gut geübt, die gemeinsame mittlere Richtung und Drehung beider Augen wahrzunehmen und nach ihr die Lage der fixierten Objekte zu beurteilen, aber schlecht geübt, die Richtung jedes einzelnen Auges zu beurteilen oder überhaupt im Bewußtsein zu trennen, was dem einen oder anderen Auge angehört*.

Wenn wir also von Richtung des Sehens reden, so sind wir nicht gewöhnt und nicht geübt die verschiedene Richtung beider Augen voneinander zu unterscheiden, und beziehen diese Richtung überhaupt auf die Mittelebene unseres Kopfes, beziehlich unseres Körpers. In diesem Sinne hat Hering Recht, wenn er die Projektionen beider Augen in das Gesichtsfeld auf einen gemeinsamen Mittelpunkt, der zwischen beiden in der Mittelebene des Körpers, in der Gegend

[1] Der wesentliche Unterschied gegen die Regel von Hering ist, daß ich das Zyklopenauge Raddrehungen machen lasse, während Hering dessen Netzhauthorizont immer in der Visierebene liegen läßt.

* Über die Unterscheidung rechts- und linksäugiger Eindrücke s. auch § 31 und die darauf bezügl. Anm. 4 am Schlusse desselben. K.

des Nasenrückens liegt, bezieht. Es ist dies ein richtiger Ausdruck der Tatsachen, wenn ich es auch nicht, wie der genannte Beobachter, als ursprüngliches Fundament für die Erklärung der Gesichtserscheinungen benutzen möchte, schon deshalb nicht, weil auf einen Teil der hierher gehörigen Erscheinungen die Richtung der Aufmerksamkeit einen merklichen Einfluß hat.

Man blicke mit einem Auge nach einem entfernten Objekte und halte vor den unteren Teil des Gesichtes ein Blatt Papier so, daß man die eigenen Hände und Arme nicht sehen kann. Man schiebe dann den Zeigefinger der rechten Hand unter dem deckenden Schirme so in die Höhe, als wollte man nach dem gesehenen Gegenstande hinzeigen. Der Finger wird hinter dem Papier links von dem fixierten Gegenstande zum Vorschein kommen, wenn man mit dem rechten Auge hinblickt, rechts, wenn man mit dem linken sieht.

Umgekehrt ist der Erfolg, wenn man nicht nach einem entfernten Objekte, sondern nach einem nahen, etwa einem Pünktchen am Rande des Papierschirmes blickt und den Finger in größerer Entfernung so hervorzuschieben sucht, daß er gerade hinter diesem Pünktchen erscheine.

Dieser Erfolg entspricht der von Hering aufgestellten Regel. Beim gewöhnlichen unbefangenen Sehen beziehen wir die Sehrichtungen auf unsere Nasenwurzel und schieben den Finger ein zwischen diese und das fixierte Objekt, wobei er denn in der Tat nicht in die wirkliche Gesichtslinie zu liegen kommt.

Der hier beschriebene Versuch mißlingt aber auch oft. Wenn ich nämlich meine Aufmerksamkeit auf den Umstand konzentriere, daß ich nur mit dem rechten Auge sehe und lebhaft an den Ort des rechten Auges im Kopfe denke und dann den Finger vorschiebe, um das fixierte Objekt zu verdecken, so schiebe ich ihn wirklich in der richtigen Richtung vor.

Wir kommen auf die hier besprochenen Erscheinungen noch wieder zurück in der Lehre vom Doppelsehen.

Hierher gehört auch die Erfahrung, die ich oft gemacht habe, daß, wenn ich bei geschlossenen Augen einen Zeigefinger in die Höhe halte und ihn mit noch geschlossenen Augen zu fixieren suche, ich im Moment des Öffnens Doppelbilder des Fingers sehe, welche parallele oder fast parallele Richtung der Blicklinien anzeigen, wobei diese Linien auf beiden Seiten ungefähr gleich weit am Finger vorbeischießen. Sonderbarerweise erhalte ich aber eine deutlichere Vorstellung vom Orte des Fingers, wenn ich bei geschlossenen Augen seine Spitze mit dem Daumen derselben Hand berühre und reibe. Dann bin ich in der Tat imstande, schon bei geschlossenen Lidern die Augen so einzustellen, daß ich den Finger einfach sehe im Augenblick, wo ich sie aufschlage. Dasselbe geschieht auch, wenn ich mit dem Finger einen äußeren festen Körper berühre und betaste.

Wenn nun endlich durch die Vergleichungen der Tast- und Gesichtswahrnehmungen die Kenntnis der Richtung gewonnen ist, in der wir die gesehenen objektiven Gegenstände zu suchen haben, so ergibt sich daraus auch schließlich die Lokalisation der anderweitig entstandenen optischen Bilder und subjektiven Erregungen unserer Netzhaut und unseres Sehnervenapparats.

Wir verlegen nämlich alle Erregungen der Sehnervenfasern nach dem Gesetze hinaus in den Raum, daß wir Lichterscheinungen in denjenigen Teilen des Sehfeldes oder beider Sehfelder zu haben glauben, in denen körperliche Objekte erscheinen würden, welche imstande wären, durch ihr Licht die ent-

sprechenden Stellen der Netzhäute zu beleuchten. Die Richtigkeit dieser Behauptung zeigt sich einfach dann, wenn wir subjektive Erscheinungen hervorrufen, während gleichzeitig wirkliche Objekte im Gesichtsfelde gesehen werden. Wenn wir z. B. ein Nachbild von der Sonne im Auge entwickelt haben und nach der Landschaft hinsehen, so deckt sich dieses Nachbild mit gewissen äußeren Objekten, welche wir wegen der Existenz des Nachbildes schlechter sehen als wir sonst getan hätten. Gewisse Teile der Netzhaut sind ermüdet; die Bilder derjenigen äußeren Objekte, welche sich darauf abbilden, sind dunkler als sonst. Der Inbegriff dieser dunkleren Objekte im Gesichtsfelde ist das Nachbild. Es ist also selbstverständlich, daß das Nachbild im Gesichtsfelde zusammenfällt mit denjenigen Objekten, welche sich auf der ermüdeten Stelle der Netzhaut abbilden. Ebenso können Schatten entoptischer Objekte, Gefäßfiguren, Druckbilder, elektrische Bilder im Gesichtsfelde mit äußeren Objekten zusammenfallen. Eine solche Koinzidenz bewirkt allemal, daß die Empfindung des von außen kommenden Lichts gewisser Punkte des Gesichtsfeldes entweder ausgelöscht, oder geschwächt, oder mit anderen subjektiven Lichtempfindungen gemischt wird. Indem wir die entsprechende Veränderung in dem Aussehen gewisser äußerer Punkte bemerken, kann natürlich die Veränderung im Gesichtsfelde nicht anders lokalisiert werden, als diejenigen Punkte, welche verändert erscheinen, schon lokalisiert sind, und die subjektive Erscheinung muß nach denselben Regeln in die Außenwelt hinausverlegt werden, welche als Ergebnis der Erfahrung für die durch wirkliches äußeres Licht wahrgenommenen Punkte erlernt worden sind.

Nun können freilich einzelne subjektive Lichterscheinungen auch im ganz dunklen Gesichtsfelde vorkommen, wo sie natürlich nach derselben Regel lokalisiert werden. Wenn sie hier auch nicht mit wahrnehmbaren Bildern wirklich gesehener äußerer Gegenstände zusammenfallen, so ist doch für jede Stelle der Netzhaut durch Erfahrung die Richtung schon bekannt, in welcher gesehene Objekte liegen müßten, die sich auf ihr abbilden, mit welchen alsdann das subjektive Phänomen zusammenfallen würde. Daß auch im dunkeln Felde die subjektiven Erscheinungen, Nachbilder zum Beispiel, nach demselben Gesetze wie die Eindrücke wirklich gesehener Objekte lokalisiert werden, zeigt sich empirisch dann, wenn wir das dunkle Gesichtsfeld, ohne das Auge zu bewegen, plötzlich hell machen; so sehen wir auch das Nachbild, und zwar ohne daß es seinen Platz veränderte, nunmehr mit bestimmten Objekten vor uns zusammenfallen und diese decken. Da es beim Übergang von Dunkel zu Hell seinen Platz nicht änderte, so war es also schon vorher so lokalisiert, wie die äußeren Objekte, mit denen es schließlich zusammenfiel.

Diese Betrachtungen lassen wohl über die Richtigkeit unseres Gesetzes keinen Zweifel, wonach jeder Eindruck auf die Netzhaut genau in denjenigen Teil des Gesichtsfeldes verlegt wird, wo ein äußeres Objekt erscheinen würde, welches passend gelegen ist, um bei geradlinigem Einfall des Lichtes in das Auge denselben Eindruck auf die Netzhaut zu machen.

Das Gesetz läßt sich auch durch direktere Versuche erweisen, aber freilich nicht mit sehr großer Schärfe. Wir wissen, daß ein rechts gelegenes leuchtendes Objekt auf der linken Seite der Netzhaut abgebildet wird, ein links gelegenes auf der rechten, ein oben liegendes unten, ein unten liegendes oben. Bei Leuten mit dünnen und durchscheinenden Augenhäuten können wir das optische Bild eines sehr hellen Lichtes, ja sogar an den angegebenen Stellen

durch die Sclerotica scheinen sehen Bd. I, S. 43). Wenn wir nun die rechte Seite des Auges mit dem Nagel drücken, sehen wir das Druckbild links (Bd. II, S. 7). Wenn wir durch eine Brennlinse starkes Licht außen auf die rechte Seite der Sclera auffallen lassen, erscheint uns links im Gesichtsfelde eine entsprechende Lichterscheinung. Wenn wir an der genannten Stelle einen absteigenden elektrischen Strom aus dem Auge austreten lassen, erscheint uns ebenfalls links der entsprechende helle Fleck.

Wenn wir das Auge dagegen links reizen, haben wir die subjektive Erscheinung rechts im Gesichtsfelde, wenn wir unten reizen, haben wir sie oben, wenn oben, unten.

Die optischen Täuschungen, welche auf diesem Prinzipe beruhen, sind sehr zahlreich. Wir können sie in folgende Hauptklassen einteilen:

1. Die Lichtstrahlen des Objekts sind, ehe sie in das Auge treffen, von ihrem Wege abgelenkt worden durch Reflektion, Refraktion oder Diffraktion. Wenn das Licht nach der Veränderung seines Weges homozentrisch bleibt, so glauben wir im allgemeinen, mit Vorbehalt der beschriebenen Urteilstäuschungen, das Objekt an derjenigen Stelle des Raumes zu sehen, wo der Durchschnittspunkt der in das Auge eintretenden (nötigenfalls rückwärts verlängerten Strahlen liegt. Wir nennen diesen Durchschnittspunkt deshalb das optische Bild des Objektes (Bd. I, S. 44). Von dieser Art sind die optischen Wirkungen unserer dioptrischen und katoptrischen Fernröhre und Mikroskope, unserer ebenen und kugelig gekrümmten Spiegel, der Lupen und anderer Glaslinsen, so wie auch der Prismen, wenn sie so angewendet werden, daß sie merklich homozentrisches Licht geben. Ich brauche hier auf die Wirkung dieser Instrumente nicht näher einzugehen, da die Lehre davon einen breit und sorgfältig ausgebildeten Zweig der physikalischen Optik bildet. Alle diese Instrumente entwerfen optische Bilder der Objekte, welche wir statt der letzteren zu sehen glauben, sie bringen also optische Täuschungen hervor, aber solche, deren Irrtum wir leicht zu vermeiden wissen, während wir imstande sind an den vergrößerten oder sonst veränderten optischen Bildern mancherlei zu erkennen, was wir bei direkter Betrachtung des Objekts nicht erkennen können. Ein ebener Spiegel läßt uns die Objekte von einem Standpunkte aus sehen, den wir in Wirklichkeit oft nicht einnehmen können, nämlich vom Standpunkte eines hinter der Spiegelebene befindlichen Beobachters, der z. B. unser eigenes Gesicht von vorn erblickt, was wir direkt nicht können. Ein Prisma trennt uns die Bilder eines lichten Objekts, welche den verschiedenen einfachen Farben seines Lichts entsprechen, und so fort.*

Wenn bei der Veränderung des Weges das Licht nicht homozentrisch bleibt, erblicken wir dagegen mehr oder weniger verwaschene lichte Stellen in denjenigen Teilen des Gesichtsfeldes, welche den beleuchteten Stellen der Netzhaut entsprechen. Von dieser Art sind die Erscheinungen des Regenbogens, die Diffraktionsfransen, das Glitzern bewegten Wassers und so weiter.

---

* Hier ist auch der Fall anzureihen, daß das Licht auf anderem als dem gewöhnlichen Wege, nämlich durch die Sclera zur Netzhaut gelangt. Es ist gelegentlich die Meinung vertreten worden, daß in diesem Falle paradoxerweise eine abweichende Lokalisation stattfände (Veraguth, Zeitschr. f. Psychol. 1. Abt. XLII. S. 162), eine Annahme, die sich jedoch durch die Kontrollversuche als eine Täuschung erwiesen hat. Grützner, Pflügers Archiv 121. S. 798. 1908. K.

2. Das Licht fällt geradlinig in das Auge, letzteres ist aber nicht für den leuchtenden Punkt akkommodiert. Ist die Pupille frei, so erscheinen in einem solchen Falle im Gesichtsfelde statt leuchtender Punkte leuchtende Flächen mehr oder weniger unregelmäßig gebildet in Form der bekannten strahligen Figur kleiner Zerstreuungskreise (Bd. I, S. 162); kleinere Objekte, wie die Mondsichel, erscheinen sehr gewöhnlich als doppelt oder mehrfach (Bd. I, S. 163). Es sind diese Erscheinungen bedingt dadurch, daß das Licht eines Punktes des Objekts nicht mehr auf einen einzelnen Punkt der Netzhaut konzentriert wird, sondern sich über eine kleine Fläche derselben zerstreut. Der beleuchteten Netzhautfläche entsprechend wird eine flächenhaft ausgebreitete Lichterscheinung im Gesichtsfelde gesehen.

Wenn nicht die ganze Pupille frei ist, sondern man durch ein Kartenblatt mit einer engen Öffnung blickt, so erscheinen die Objekte auch in falscher Richtung und Größe; bewegt man das Kartenblatt, so bewegt sich auch scheinbar der Gegenstand, wie dies Bd. I, S. 105—107 erklärt ist. Hier hat allerdings jeder helle Punkt des Objekts ein fast punktförmiges Bild auf der Netzhaut, aber dieses hat wegen der mangelhaften Akkommodation des Auges nicht seine normale Lage.

Wenn man durch Kartenblätter mit zwei oder drei Öffnungen sieht, erblickt man bei mangelhafter Akkommodation die Objekte verdoppelt oder verdreifacht.

Diese Versuche sind wichtig, weil sie erkennen lassen, daß auch die genaue Akkommodation des Auges mit zu den Bedingungen des normalen Sehens gehört, auf welches sich die Einübung bei der Lokalisation der Sinneseindrücke bezieht. Wir projizieren die Zerstreuungskreise oder die Teile der Zerstreuungskreise, welche beim Sehen durch enge Öffnungen stehen bleiben, so in das Gesichtsfeld, als wären es Bilder, die bei genauer Akkommodation gebildet wären. Für jeden beleuchteten Punkt der Netzhaut setzen wir auch dabei wieder einen lichten Punkt in das Gesichtsfeld. Es haben auch diese Versuche bei der Entwickelung der physiologischen Optik einige Wichtigkeit gehabt, weil sie erkennen ließen, daß nicht die Richtung, in welcher ein Lichtstrahl in das Auge gelangt, noch die Richtung, in welcher er die Netzhaut trifft, sondern nur der Ort der Netzhaut, welcher getroffen wird, die Richtung der Projektion bestimmen. Betrachtet man Fig. 56, Bd. I, S. 107, so weichen hier die Projektionslinien $f\varphi$ und $g\gamma$ wesentlich von den wirklichen Richtungen der gebrochenen und ungebrochenen Strahlen ab.

3. Es erscheinen körperliche Objekte aus dem Auge selbst, wie die entoptischen Objekte, fliegenden Mücken, Gefäßschatten, Netzhautgrube usw., wie sie im 15. und zum Teil im 25. Paragraphen beschrieben sind. Diese beschatten die hintere Schicht der Netzhaut und erscheinen deshalb im Gesichtsfelde selbst als Schatten. Die optische Täuschung versetzt hierbei also Gegenstände, die im Auge liegen, nach außen und zwar meistenteils in verkehrter Lage, da gewöhnlich der Schatten des Objekts auf der Netzhaut aufrecht stehend ist. Da die Lage dieser Gebilde sich nur durch ihre subjektive Erscheinung bestimmen läßt, so lehren sie für die Theorie nichts Neues.

4. Die Nerven werden gereizt, oder ihre Erregungsstärke wird verändert. In diesen Fällen ist nicht das Licht selbst, sondern die Lichtempfindung verändert; hierher gehören die Druckbilder, das Akkommodationsphosphen, die leuchtenden Garben an der Eintrittsstelle des Sehnerven bei

Bewegung des Auges, das Eigenlicht der Netzhaut, die elektrischen Erscheinungen, wie sie im 17. Paragraphen beschrieben sind. Bei dieser letzten Klasse von Erscheinungen besteht die Täuschung nicht mehr allein in einer falschen Lokalisation eines leuchtenden oder dunklen Objekts. Es ist vielmehr gar kein solches vorhanden, sondern nur die Empfindung, welche der Regel nach durch solche Objekte hervorgebracht zu werden pflegt.

Bei gesunden Menschen im wachen Zustande treten alle diese täuschenden Erscheinungen, welche wir beschrieben haben, im Gesichtsfelde wohl ein, und lassen sich nicht einmal beseitigen durch die bessere Einsicht, wodurch sie als Täuschungen anerkannt werden. Indessen ist diese bessere Einsicht in der Regel vorhanden, die Täuschung ist als Täuschung anerkannt. Wenn wir durch ein optisches Instrument oder in einen Spiegel sehen, so wissen wir, daß wir unter abgeänderten Bedingungen sehen, und lernen bald die richtigen Urteile über die wirkliche Beschaffenheit der Gegenstände mittels des falschen Bildes fällen. Wir lernen zum Beispiel nach dem Anblick des Spiegelbildes uns rasieren, kämmen usw., trotzdem dieses Bild überall rechts und links verkehrt zeigt. Wir lernen nach einiger Übung mit Nadeln unter der Lupe oder selbst unter dem zusammengesetzten Mikroskope zu präparieren, obgleich beide Instrumente jede Bewegung unserer Hand in übertriebener Größe, das letztere auch in verkehrter Richtung zeigen, so daß wir also sogar eine neue Einübung unserer Bewegungen nach falschen optischen Bildern ausbilden können.

Bei den übrigen Erscheinungen, welche in dem Auge selbst ihren Grund finden, scheint es namentlich der Umstand, daß die subjektiven Phänomene sich mit dem Auge bewegen, zu sein, welcher sie als subjektiv erkennen läßt. Bei schnell aufblitzenden Erscheinungen der Art, welche ebenso schnell wieder verschwunden sind, fällt dieses Merkmal fort, und da kann man in der Tat oft zweifelhaft sein, ob man etwas Wirkliches gesehen habe. Wenn man zum Beispiel im Finsteren seinen Weg sucht und im indirekten Sehen bei einer Bewegung des Körpers und Auges seitlich ein Lichtschein aufblitzt, ist mitunter der bestunterrichtete Beobachter außerstande bestimmt zu sagen, ob ein solcher objektiv oder subjektiv war. Daß manche Gespenstergeschichten durch solche subjektive Erscheinungen hervorgerufen sind, ist sehr wahrscheinlich. Das Eigenlicht der Netzhaut ist reich an Gestaltungen, denen von einem furchtsamen Menschen leicht allerlei wunderliche Deutungen untergeschoben werden können, namentlich wenn er das Auge starr auf die gefürchtete Erscheinung richtet und daher nicht bemerken kann, daß sie sich mit dem Auge bewegt. In Fiebern und Gehirnkrankheiten, wo die regelrechte Verbindung der Vorstellungen gestört ist, die einzelnen nicht fest gehalten, verglichen und kombiniert werden können, fehlt dann auch die zur Anerkennung der subjektiven Natur der genannten optischen Erscheinungen nötige Überlegung, und es knüpfen sich daran häufig phantastische Vorstellungen. Im Säuferwahnsinn sind schwarze Flecke im Gesichtsfelde, welche sich mit dem Auge schnell umherbewegen; diese erwecken die Vorstellung von herumlaufenden Mäusen, schwarzen Käfern oder Fliegen. In Fieberphantasien erkennt man aus den Beschreibungen der Kranken dagegen oft die lichten und farbigen Punkte und Kreise wieder, welche bei leichtem Druck auf das Auge auch bei Gesunden hervorgebracht werden können und bald für Feuerfunken, bald für feurige Augen usw. gelten.

Bei den bisher beschriebenen Erscheinungen ist von uns immer angenommen worden, daß der Kopf aufrechte Haltung habe, oder wenn nicht, daß wir eine

richtige Kenntnis seiner Neigung haben. Schließlich ist noch eine Täuschung zu erwähnen, welche von einer falschen Schätzung der Richtung des Kopfes herrührt. AUBERT[1] brachte in einem Fensterausschnitt eines übrigens verdunkelten Zimmers einen Spalt von 5 cm Länge und 2 cm Breite an, der den einzigen hellen und sichtbaren Gegenstand in dem umgebenden Raume bildete. War diese helle Linie vertikal und neigte er den Kopf nach rechts, so daß das rechte Ohr sich nach unten richtete, so erschien die Linie geneigt von rechts unten nach links oben. Neigung des Kopfes nach links gab die entgegengesetzte Scheinverschiebung der Linie. War die Linie unter 45° gegen den Horizont geneigt und verlief von links unten nach rechts oben, so erschien sie bei der Neigung des Kopfes nach rechts vertikal, ja über die Vertikale hinaus nach entgegengesetzter Richtung gedreht. Bei der Neigung nach links erschien sie horizontal, ja über die Horizontale hinausgedreht. Das Maximum der Drehung der hellen Linie trat ein, wenn der Kopf um etwa 135° geneigt war.*

Die Drehung der hellen Linie folgt der Neigung des Kopfes, wenn diese langsam ausgeführt wird, ziemlich unmittelbar; neigt man aber den Kopf plötzlich bedeutend, so vergehen einige Sekunden, bevor die Linie die Drehung vollendet.

Wenn man bei unverändert schiefer Haltung des Kopfes das Zimmer beleuchten läßt, so erscheint die vertikale Linie wieder vertikal. Läßt man das Licht auslöschen, so geht sie in ihre frühere Neigung zurück.

Wir haben es hierbei nicht zu tun mit einer wirklichen Drehung des Auges im Kopfe, wie man sich mit Hilfe von Nachbildern überzeugen kann. Ein im vertikalen Meridian des Auges entwickeltes Nachbild scheint bei einer Drehung des Kopfes um einen rechten Winkel nach rechts im dunklen Zimmer nicht horizontal zu liegen, wie es wirklich liegt, sondern schräg von links unten nach rechts oben, und eine objektive helle Linie, welche wirklich diese letztere Neigung hat, erscheint vertikal.

Die Täuschung beruht vielmehr darauf, daß wir im Dunkeln die Seitenneigung unseres Kopfes für kleiner halten, als sie wirklich ist.

Statt im dunklen Zimmer zu beobachten, kann man die Linie auch an einer einförmig angestrichenen Wand anbringen und vor das Gesicht einen zylindrischen Schirm anbringen, der den Anblick aller seitwärts gelegenen Gegenstände verhindert.

Es gehören hierher ferner die bekannten Erscheinungen über die Scheinbewegung der gesehenen Gegenstände, wenn unser Körper selbst auf einem Nachen oder in einem langsam und leise vorwärts bewegten Eisenbahnwagen in Bewegung ist, oder umgekehrt die täuschende Erscheinung einer eigenen scheinbaren Bewegung, wenn wir selbst zwar ruhig sitzen, aber die vor uns befindlichen Gegenstände mit konstanter Geschwindigkeit bewegt sind. Das größte Beispiel der ersteren Art ist die scheinbare Ruhe der Erde und die scheinbare Bewegung des Sternenhimmels. Zweifel entstehen oft, wenn auf einer Station zwei Eisenbahnzüge nebeneinander halten, in deren einem sich der Beobachter befindet und den anderen betrachtet. Wenn dann einer von beiden sich in Bewegung setzt, ist es oft schwer zu ermitteln, ob dies der

[1] VIRCHOWS Archiv für pathologische Anatomie und Phys. Bd. XX.

* Über die hier besprochene Erscheinung vgl. Anm. 4 am Schlusse des Paragraphen. K.

eigene oder der andere ist, wenn es nicht gelingt feststehende Teile des Erdbodens oder der Gebäude zu sehen. Auch in Sternwarten mit drehbarem Kuppeldach, wie solche für die Aufstellung des Heliometers gebraucht werden, tritt bei der Drehung des Daches wohl die Täuschung ein, daß sich der Fußboden drehe und das Dach still stehe.

Im allgemeinen hält man dabei gewöhnlich den größeren Teil des gesehenen Gesichtsfeldes für ruhend, den kleineren für bewegt. Dann kommt aber hinzu, daß wir beim Anfange einer Bewegung Stöße oder Erschütterungen unseres Körpers oder wenigstens Wirkungen der Trägheit seiner schweren Masse zu fühlen erwarten. Wenn nun die Bewegung sehr leise beginnt, wie die eines Nachens, so glauben wir nicht uns in Bewegung zu befinden, oder wenn wir Stöße gefühlt haben, wie von einem dicht daneben fahrenden Eisenbahnzuge, die sich auf den stehenden übertragen, so glauben wir bewegt zu sein. Wenn die eine oder andere Deutung gleich möglich ist, kann der Beobachter auch willkürlich die eine oder andere Anschauung in sich erzeugen.

Für die Beobachtung des Gesichtsschwindels, der durch eine angeschaute Bewegung entsteht und den Herr J. J. Oppel an strömendem Wasser (dem Rhein bei Schaffhausen kurz vor dem Falle) bemerkt hatte, hat derselbe einen Apparat konstruiert, den er Antirrheoskop nennt und mit dem man die Erscheinung jederzeit beobachten kann. Derselbe besteht aus fünf parallel nebeneinander liegenden Walzen von $2^1/_2$ Zoll Durchmesser und $2^1/_2$ Fuß Länge, welche durch eine größere Rolle alle nach derselben Richtung in Umdrehung gesetzt werden können. Jede Walze ist mit weißem Papier überzogen, auf dem je zwei schwarze Spiralen von je $2^1/_2$ Windungen gezeichnet sind. Jede Spirale besteht wiederum aus einem breiten mittleren schwarzen Streifen von $1^1/_2$ Zoll Breite, neben dem in einer Entfernung von je einem halben Zoll zwei schmälere schwarze Streifen von einem halben Zoll Breite hergehen. Das weiße Band zwischen dem schwarzen Streifen der einen und der nächstbenachbarten Spiralwindung hat dann wieder $1^1/_2$ Zoll Breite, so daß Weiß und Schwarz symmetrisch verteilt sind. Wird nun die größere Scheibe, deren Rand mit Reibung an den Enden der Walzen schleift, gedreht, so drehen sich alle Walzen in gleichem Sinne, die mittleren mit etwas größerer Geschwindigkeit als die äußeren, um die ungleiche Bewegung des Wassers im Flusse nachzuahmen. Die Spiralbänder scheinen dann mit gleichförmiger Geschwindigkeit sich der Länge der Walzen parallel zu verschieben, und wenn der Beobachter eine Zeitlang auf die scheinbar bewegten Bänder hingeblickt hat und nun auf ruhige Objekte sieht, scheinen diese rückwärts zu gehen.

Herr Oppel hat vor den Walzen auch noch ein Gesichtszeichen befestigt, um den Blick fixiert zu halten. Da aber bei fester Fixation dieses Zeichens, wie es scheint, der Versuch ihm oft mißlungen ist, und er glaubte, daß feste Fixation zur Erzeugung des Schwindels nötig und daß die feste Fixation nur durch den Anblick der bewegten Masse gehindert sei, so hat er als Fixationszeichen ein rautenförmiges Holztäfelchen von $^1/_2$ Zoll Breite und $^3/_4$ Zoll Höhe angewendet, welches selbst langsam durch die Mechanik des Instruments gedreht wurde und dem Beschauer bald die eine, bald die andere Seite zukehrte. Hiermit gelangen die Versuche, weil, wie ich selbst meine, durch diese Einrichtung dauernde feste Fixation ein und desselben festen Punktes unmöglich gemacht war, da jeder Punkt des Holztäfelchens, den man etwa hätte fixieren wollen, abwechselnd schwand und wieder zum Vorschein kam. Ich selbst muß nach meinen Versuchen gerade das Entgegengesetzte von Oppel behaupten, nämlich, daß bei ganz strenger Fixierung des Blicks der Schwindel nicht zustande kommt, sondern nur durch die unwillkürlichen und meist unbewußten kleinen Bewegungen, mittels deren wir den bewegten Körpern folgen. Darin aber hat Oppel recht, daß größere willkürliche Bewegungen des Auges, mit denen wir bewußter-

weise eine längere Strecke hindurch dem bewegten Körper folgen, der Täuschung hinderlich sind.

Daß man die Objekte aufrecht sieht, ohngeachtet ihre Netzhautbilder verkehrt sind, schrieb KEPLER[1] der Seele zu, welche den Eindruck auf einen unteren Teil der Netzhaut sich so vorstellen soll, als wenn er von den Strahlen eines höheren Punktes der Sache entstände. Ebenso SCHEINER[2]. PRIESTLEY[3] leitet diese Eigentümlichkeit der Gesichtsvorstellungen aus der Vergleichung mit dem Tastsinn her. DESCARTES[4] erläutert die natürliche Methode, die Größe, Lage und Entfernung der Gegenstände aus der Richtung der Augenachsen zu beurteilen, indem er sie vergleicht mit der Art, wie ein Blinder von der Größe und Entfernung einer Sache vermittelst zweier Stäbe, selbst von unbekannter Länge, urteilt, wenn seine Hände, worin er die Stäbe hält, in einer bekannten Entfernung und Lage gegeneinander sind. Übrigens veranlaßte die Frage wegen des Aufrechtsehens der Objekte eine große Menge von Schriften[5].

KEPLER[6] fand auch schon die richtige Regel für die scheinbare Lage der durch brechende oder spiegelnde Instrumente gesehenen Objekte, indem er sie in den Konvergenzpunkt der in das Auge tretenden Strahlen verlegte. Die Schwierigkeiten, welche später zu vielfachen Diskussionen über diesen Punkt führten, betrafen nicht sowohl die Richtung, in der das Objekt gesehen wurde, als vielmehr seine Entfernung, wovon im folgenden Abschnitt zu sprechen sein wird.

PORTERFIELD[7] glaubte, daß wir vermöge einer ursprünglichen Einrichtung unserer Natur die Gegenstände irgendwo in der geraden Linie sehen, die senkrecht auf die Netzhaut an der Stelle, wohin das Bild fällt, gezogen wird. Dieselbe Annahme wurde auch von D'ALEMBERT[8], BARTELS[9] und vielen anderen festgehalten. VOLKMANN[10] hat für die Normalen der Netzhaut die Richtungslinien gesetzt, welches nach der Bd. I, S. 77 gegebenen Definition die durch das Netzhautbild und den (hinteren) Knotenpunkt des Auges gezogenen Linien sind. Diese Linien sind in der Tat die richtigen, um objektiv bei physikalischen Untersuchungen den leuchtenden Punkt zu finden, wenn der Ort des Netzhautbildes in dem gut akkommodierten Auge und dessen Stellung vollständig gegeben sind. So spielen also die Richtungslinien eine wichtige Rolle in der physiologischen Optik, namentlich, wo es sich darum handelt, zu ermitteln, mit den Bildern welcher äußeren Objekte irgendwelche Erregungen der Netzhaut durch Licht oder durch innere Reize sich decken. Soweit wir also den Ort der gesehenen Gegenstände objektiv richtig beurteilen, soweit ist VOLKMANNS Darstellungsweise im Recht. Eine solche richtige Beurteilung trifft aber fast nur zu für die direkt mit beiden Augen gesehenen Punkte und selbst für diese nicht immer. Alle indirekt gesehenen Punkte verlegen wir in falsche Richtungen, indem wir den Winkel zwischen ihrer Richtungslinie und der Blicklinie zu klein nehmen, wie der vorige Paragraph gelehrt hat, und so oft wir die Augen konvergieren lassen und auf nähere Objekte richten, beurteilen wir die Richtungen der gesehenen Objekte falsch, wie die oben beschriebenen Versuche lehren. Eine Hauptschwierigkeit der Theorie von VOLKMANN

[1] Paralipomena p. 169. — SMITH, *Opticks. Rem.* p. 4.

[2] Oculus p. 192.

[3] Geschichte der Optik, übersetzt von KLÜGEL. Leipzig 1776. S. 69.

[4] Dioptrice p. 68 und De homine p. 66.

[5] KAESTNER im Hamburger Magazin VIII, St. 4, Art. 8; IX, St. 1, Art. 4. — LICHTENBERG in ERXLEBENS Naturlehre. 6. Aufl. S. 328. — RUDOLPHI, Physiologie II, 227. — L. FICK in MÜLLERS Archiv für Anatomie. 1854. S. 220. — Noch andere unten im Literaturverzeichnis.

[6] Paralipomena p. 285 und p. 69—70.

[7] *On the eye* II, 285.

[8] Opuscula mathem. I, p. 26.

[9] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Berlin 1834.

[10] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, Leipzig 1836, und Artikel Sehen in R. WAGNERS Handwörterbuch der Physiologie. — S. auch MILE über Richtungslinien des Sehens, POGGENDORFFS Annalen XLII, 245, und MÜLLERS Archiv für Anatomie. 1838. S. 387.

ist die Erklärung der binokularen Doppelbilder, wie HERING[1] richtig bemerkt hat. Wir können also die Theorie von VOLKMANN nicht als ein angeborenes und elementares Gesetz auffassen, welches an und für sich schon die Richtung des Gesehenen bestimmte. Ein wesentliches Verdienst HERINGS ist es, den Einfluß der Konvergenzstellungen hierbei in das Licht gestellt zu haben.

Den Einfluß der Schwindelbewegungen und Scheinbewegungen haben untersucht PLATEAU[2], OPPEL[3] und ZOELLNER[4]; den Einfluß falscher Beurteilung der Kopfstellung AUBERT[5]; über den Einfluß der Lähmung einzelner Muskeln A. v. GRAEFE[6] und NAGEL[7].

1604. KEPLER ad VITELLIONEM, Paralipomena. p. 169; 285; 69—70.
1619. SCHEINER, Oculus, Oenipontii. 1619. p. 192.
1637. DESCARTES, Dioptrice. Leyden. p. 68.
1667. HONORATUS FABRI, Synopsis optica. Lugd.
1709. BERKELEY, *Essay towards a new theory of vision.*
1740. LE CAT, *Traité des sens.* Rouen.
— WEDEL, Über den Radius visorius des HONORATUS FABER in HALLERI Disputat. anat. IV, 216.
1754. CONDILLAC, *Traité des sensations.*
1759. PORTERFIELD, *A treatise on the eye.* Edinb. Vol. II. p. 285.
1761. D'ALEMBERT, Opuscula mathem. I. p. 26; 265.
1771. BOEHM, De Visione erecta. Acta Hassiaca. 64.
1772. PRIESTLEY, *History and present state of discoveries relating to vision, light and colours.* Übers. v. KLÜGEL. Leipzig 1775. S. 69.
1783. ROCHON im *Recueil de Mémoires sur la Mécanique et Physique.* VI. p. 241.
1784. DU TOUR, *Mémoire pour établir que le point visible est vu dans le rayon qui va de ce point à l'oeil. Mémoires de savans étrang.* Paris. VI. p. 241.
— FEARN, *A rationale of the laws of cerebral vision, composing the laws of single and erect vision, deduced upon the Principle of Dioptrics.* London.
1788. WALTER, Berliner deutsche Abhdl. 3.
1793. ARALDI, *Esame di uno fra i diversi dubbi messi dal celebre* D'ALEMBERT *ai principi dell' Ottica; con alcune considerazioni sopra la teoria psicologica della visione. Memor. dell' Istit. nazion. Ital.* I. p. 451.
1794. LICHTENBERG in ERXLEBENS Naturlehre. 6. Aufl. S. 328.
— KAESTNER im Hamburger Magazin VIII, St. 4, Art. 8; IX, St. 1, Art 4.
1820. RUDOLPHI, Physiologie. II. 227.
1826. J. MÜLLER, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig.
1834. BARTELS, Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Berlin.
1836. VOLKMANN, Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig. Auch in R. WAGNERS Handwörterbuch der Physiologie. Artikel: Sehen.
1837. MILE, Über Richtungslinien des Sehens. POGGENDORFFS Ann. XLII. 245; und in J. MÜLLERS Anat. u. Physiol. 1838. S. 387.
1844. D. BREWSTER, *Law of visible position in single and binocular vision. Edinb. Trans.* XV. 1844.
1849. PLATEAU, *Sur de nouvelles applications curieuses de la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Bruxelles* XVI. II. 30, 254. *Institut* XVIII. Nr. 835. p. 5. *Phil. Magaz.* XXXVI. 434, 436. POGGENDORFFS Ann. LXXX. 150, 287.
1852. H. BOENS, *Étude sur la vision de l'homme et des animaux. Bull. de Bruxelles* XIX. 2. p. 155—161. (*Cl. des sciences.* 1852. p. 443—449.)
— LOTZE, Medizinische Psychologie. S. 362—369.

[1] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861. S. 35—64.
[2] *Bulletin de Bruxelles* T. XVI. — POGGENDORFFS Annalen LXXX. S. 287.
[3] POGGENDORFFS Annalen XCIX. 543.
[4] Ebenda CX. 500.
[5] VIRCHOWS Archiv für pathologische Anatomie XX. 381—393.
[6] Archiv für Opththalmologie I, 1. S. 67.
[7] Das Sehen mit zwei Augen. Breslau 1861. S. 124—129.

1854. L. Fick, Bemerkungen zur Physiologie des Sehens. Müller, Archiv für Anat. und Physiol. 1854. S. 220—225.
— A. v. Graefe, Beiträge zur Physiologie und Pathologie der schiefen Augenmuskeln. Archiv für Ophthalmol. I, 1. S. 67.
1855. H. Helmholtz, Über das Sehen des Menschen. Ein populär wissenschaftlicher Vortrag. Leipzig. S. 20—42.
— E. B. Hunt, *On our sense of the vertical and horizontal. Silliman J.* (2) XX, 368—375.
1856. J. J. Oppel, Neue Beobachtungen und Versuche über eine eigentümliche, noch wenig bekannte Reaktionstätigkeit des menschlichen Auges. Poggendorffs Ann. XCIX. 540—615.
1858. Ueberweg, Zur Theorie der Richtung des Sehens. Zeitschr. für rat. Medizin. (3) Bd. V. 268—282.
1860. J. J. Oppel, Zur Theorie einer eigentümlichen Reaktionstätigkeit des menschlichen Auges in bezug auf bewegte Netzhautbilder. Jahresber. d. Frankfurter Vereins, 1859—1860, 54—64; Zeitschr. für Naturw. XVII. 258—260.
— H. Aubert, Eine scheinbare bedeutende Drehung von Objekten bei Neigung des Kopfes nach rechts und links. Virchows Archiv XX. 381—393.
1861. Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. Breslau. S. 124—129.
— E. Hering, Beiträge zur Physiologie. Leipzig. Heft 1. S. 35—64.
1862. F. Zöllner, Über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. Poggendorffs Ann. CXVII. 477—484; Zeitschr. für Naturw. XXI. 163.
1863. J. Czermak, Über das sogenannte Problem des Aufrechtsehens. Wiener Ber. XVII. 566—574.
1865. Alfred Graefe, Über einige Verhältnisse des Binokularsehens bei Schielenden. Archiv für Ophthalmologie. XI, 2. S. 6—16.

Zusätze von v. Kries.

1. Die hier von Helmholtz beschriebenen Erscheinungen werden gegenwärtig als Bewegungsnachbilder bezeichnet und man ist wohl überwiegend zu einer abweichenden Auffassung derselben gelangt. Wir können diese nicht darlegen, ohne zugleich auf die ganz allgemeinen Vorstellungen in bezug auf das Sehen von Bewegungen einzugehen, die in den letzten Jahrzehnten ausgebildet worden sind. Wir wollen daher diesen Gegenstand, dem wir überhaupt eine selbständigere Bedeutung beizumessen gelernt haben, hier vollständig und im Zusammenhang besprechen.[1]

Wir müssen an erster Stelle hier erwähnen, daß der Eindruck einer Bewegung, wie dies zuerst von Exner in einer sehr bedeutungsvollen Arbeit gezeigt worden ist, in zweifacher Weise entstehen kann, die wir als eine direkte und indirekte[2] bezeichnen können.

Die indirekte, an die man bis dahin wohl allein gedacht hatte, ist einfach dadurch gegeben, daß wir den betreffenden Gegenstand am Ende irgend eines Zeitraumes an einem anderen Orte sehen als zu Anfang; in den psychologischen Inhalt einer solchen indirekten Bewegungswahrnehmung geht also die Vorstellung

[1] Es wird hierbei nicht übersehen, daß so wie wir diese Verhältnisse jetzt auffassen, sie dem Inhalte des gegenwärtigen Paragraphen eigentlich nicht streng zugehören. Mit Recht ist daher in neuen Bearbeitungen der Gesichtswahrnehmungen dem Sehen von Bewegungen ein selbständiger Abschnitt gewidmet worden. Da wir indessen den Wunsch haben, den Rahmen der ursprünglichen H.schen Darstellung möglichst beizubehalten, so wird es gestattet sein, den Gegenstand hier einzuschieben.

[2] S. Exner, Das Sehen von Bewegungen und die Theorie des zusammengesetzten Auges. Wiener Sitzungsber. LXXII. 3. Abt. 1875. Aus den im Schlußkapitel darzulegenden Gründen kann ich mich nicht entschließen, der von Exner eingeführten Benennung folgend, hier von einem „Empfinden“ der Bewegung zu sprechen.

eines Zeitraumes und die zweier Orte ein. Es kann auf den ersten Blick scheinen, als ob sich dies stets so verhalten müsse, wo immer wir eine Bewegung bemerken. Allein es zeigt sich, daß dies keineswegs der Fall ist. Während wir allerdings das Zutreffen dieser Verhältnisse insbesondere bei langsamen und für nicht ganz kurze Zeit beobachteten Bewegungen einwandsfrei konstatieren können, finden wir, daß bei schnelleren Bewegungen der Eindruck ein ganz unmittelbarer und demgemäß auch in einer anderen eigentümlichen Weise zwingender ist. Auch bei solchen Bewegungen freilich wird es sich in den meisten Fällen so verhalten, daß wir die Ungleichheit der Orte, an denen der Gegenstand zu Anfang und zu Ende irgend eines Zeitraumes gesehen wird, bemerken und auffassen. Allein es braucht das nicht notwendig der Fall zu sein; es kann auch vorkommen, daß wir den zwingenden Eindruck von einer Bewegung eines Gegenstandes haben, dieser aber gleichwohl am Ende des Zeitraumes an keiner anderen Stelle als am Anfang gesehen wird[1]. Hier setzt sich die direkte Wahrnehmung der Bewegung mit der indirekten in einen Widerspruch, der die Unabhängigkeit beider Entstehungsweisen besonders greifbar erweist. Allein auch wo dies nicht der Fall ist, lehrt doch die aufmerksame Selbstbeobachtung, daß in diesen Fällen der Eindruck der Bewegung zu dem des Ortsunterschiedes in einer ganz anderen Beziehung steht als in denjenigen Fällen, wo wir von einer indirekten Bewegungswahrnehmung sprechen: er ist wohl von ihm begleitet, aber nicht sein Ergebnis. Man vergleiche, wie man einerseits die Bewegung eines in geringer Entfernung vorüberfliegenden Insektes oder Vogels, andererseits die eines kriechenden Käfers oder noch besser die eines in einer Entfernung von einigen Kilometern fahrenden Eisenbahnzuges wahrnimmt und man wird sich von der Richtigkeit der EXNERschen Angaben ohne Schwierigkeit überzeugen können.

Während nun die indirekte Bewegungswahrnehmung zu der Wahrnehmung der ruhenden Gegenstände in engerer Beziehung stehen muß, kommt den direkten Bewegungswahrnehmungen der Art ihrer Entstehung gemäß eine selbständige physiologische Bedeutung zu. Erwägen wir, worin sie ihre physiologische Grundlage haben können, so ist sogleich ersichtlich, daß diese eine doppelte sein kann. Einerseits können bei fixiertem Auge die Bilder eines bewegten Gegenstandes über die Netzhaut hingleiten; andererseits kann auch das Auge einem bewegten Gegenstande folgen. Das Gleiten der Netzhautbilder und die Bewegung des Auges sind also zweierlei Momente, an die als Grundlage eines unmittelbaren Bewegungseindruckes jedenfalls zu denken ist. Es ist von Bedeutung, daß wir wohl das eine, nicht aber das andere dieser Momente im Experiment isolieren können. Wir können in der Tat das Auge durch Fixierung des Blickes (wenigstens mit größter Annäherung) still stellen und dabei andere Gegenstände durch das Gesichtsfeld, ihre Bilder über die Netzhaut hingleiten lassen. Wenn wir uns dagegen die Aufgabe stellen, einem sich bewegenden Objekt mit dem Auge zu folgen, so ist es unmöglich, eine Verschiebung der Netzhautbilder auszuschließen; ja es könnte wohl sein, daß jenes Folgen des Blickes unter allen Umständen nur dadurch ermöglicht wird, daß der betreffende Gegenstand sich um kleine Beträge verschiebt und daß seine nunmehr exzentrische Wahrnehmung das Folgen des Blickes veranlaßt. In bezug auf die spezielleren Verhältnisse der Bewegungswahrnehmungen sind eine ganze Anzahl von bemerkenswerten Tat-

[1] Vgl. über diesen Punkt auch die Bemerkungen im Schlußkapitel.

sachen ermittelt worden; wir werden bei ihrer Darstellung versuchen müssen, die erwähnten Modalitäten der Bewegungswahrnehmung möglichst auseinanderzuhalten. Freilich wird sich zeigen, daß das nicht überall mit voller Sicherheit gelingt, teils wegen der in der Natur der Sache liegenden Schwierigkeiten, teils auch weil die Beobachtungen nicht immer in der hierfür wünschenswerten Weise angestellt worden sind.

Eine erste hier aufzuwerfende Frage betrifft die Werte der eben noch wahrnehmbaren oder eben nicht mehr wahrnehmbaren Bewegungen, die Schwellenwerte. Sie spaltet sich in mehrere verschiedene schon insofern, als wir eine Bewegung in verschiedener Weise variieren und auch in verschiedener Weise an die Grenze der Bemerkbarkeit bringen können. Der wohl nächstliegende aber keineswegs einfachste Fall besteht in der Verminderung der Geschwindigkeit. Es läßt sich erwarten, daß durch die Verminderung der Geschwindigkeit jedenfalls eine Grenze gefunden wird, bei der der direkte Bewegungseindruck aufhört. Diese Grenze scheint in den Beobachtungen von AUBERT[1] ermittelt worden zu sein; ihm zufolge muß ein Objekt eine Winkelgeschwindigkeit von 1—2 Bogenminuten pro Sekunde haben, „um sofort bewegt zu erscheinen", während bei geringeren Geschwindigkeiten die Bewegung erst nach einigen Sekunden wahrnehmbar wird. Wie zu erwarten, ist aber das Ergebnis solcher Versuche in hohem Grade davon abhängig, ob und in welcher Benachbarung neben den zu beobachtenden andere, ruhende Gegenstände im Gesichtsfeld vorhanden sind. Bei den eben erwähnten Versuchen war, ähnlich wie bei den älteren von PORTERFIELD (die übrigens auch ähnliche Ergebnisse lieferten), das Gesichtsfeld frei, somit eine Menge ruhender Gegenstände sichtbar. Wir kommen auf die hierdurch bedingten Unterschiede sogleich zurück. Ferner ist zu beachten, daß bei diesen Versuchen der zu beurteilende Gegenstand fixiert wurde; gemäß dem schon oben Bemerkten entzieht es sich der Beurteilung, wie weit eine Verschiebung der Netzhautbilder, wie weit die Folgebewegungen des Auges für den Bewegungseindruck in Betracht kommen. Einfacher als fixierte Gegenstände sind in dieser Hinsicht die Verhältnisse für exzentrisch gesehene zu normieren, wo die Fixation einer ruhenden (und als ruhend bekannten) Marke sich als selbstverständliche Bedingung ergibt. AUBERT[2] ermittelte hier die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Beträge.

Winkelabstand von der Fovea	Kleinste wahrnehmbare Winkelgeschwindigkeit	Winkelabstand von der Fovea	Kleinste wahrnehmbare Winkelgeschwindigkeit
15′	54″	5° 10′	5′ 30″
1° 15′	1′ 45″	7°	6′ 44″ bis 8′ 45″
2° 15′	2′ 8″	8°	9′
3° 15′	3′ bis 4′	9°	15′

Von welcher Bedeutung die Wahrnehmung ruhender Vergleichsobjekte ist, hat schon AUBERT im Anschluß an die vorher erwähnten Ergebnisse betont. Er fand etwa zehnfach höhere Schwellenwerte, wenn er das zu prüfende Objekt durch den Schlitz eines Kästchens beobachtete, wobei die sonstigen Gegen-

[1] PFLÜGERS Archiv XXXIX. S. 347, ebenda XL. S. 459. 1887.
[2] PFLÜGERS Archiv XL. S. 477. 1887.

stände verdeckt, freilich immer noch die Ränder des Schlitzes selbst sichtbar waren. Der im Grunde einfachste Fall wäre die Beobachtung eines im sonst völlig dunkeln Raume ganz allein sichtbaren Gegenstandes. Versuche, aus denen hier die Grenze einer direkten Bewegungswahrnehmung erschlossen werden könnte, sind mir nicht bekannt. In der als indirekt bezeichneten Weise würde eine Bewegung selbstverständlich immer wahrnehmbar sein, wenn wir sie zeitlich unbegrenzt in derselben Richtung andauern ließen. Von bestimmten Grenzwerten könnte nur die Rede sein, wenn wir die Dauer die Bewegung begrenzen oder die Bewegung nicht in derselben Richtung, sondern etwa in einer geschlossenen Bahn stattfinden lassen. Die Beobachtungen, die über die Wahrnehmung der Bewegung eines ganz isolierten Punktes angestellt wurden, sind übrigens auf Schwierigkeiten anderer Art gestoßen und haben die Untersucher (wenigstens zum Teil) an der Gewinnung bestimmter Werte verhindert. AUBERT insbesondere betonte vor allem das häufige Vorkommen von Täuschungen, derart, „daß man einerseits bisweilen fest überzeugt ist, Bewegungen zu sehen, wenn keine objektiven Bewegungen vorhanden sind, andererseits recht lebhafte objektive Bewegungen nicht empfindet und überhaupt nicht bemerkt". Für den ersteren Fall, das Bewegterscheinen eines objektiv ruhenden Punktes, hat AUBERT den Namen der autokinetischen Empfindung eingeführt. Die gesamten hierhergehörigen Erscheinungen sind später noch mehrfach beschrieben und untersucht worden (CHARPENTIER[1], EXNER[2]). BOURDON[3] glaubt trotz der auch von ihm bemerkten durch jene Scheinbewegungen verursachten Schwierigkeiten doch zu annähernd bestimmten Schwellenwerten gelangen zu können; er gibt an, daß bei Geschwindigkeiten von 14 bis 21 Bogenminuten pro Sekunde die Bewegung in der Mehrzahl der Fälle noch richtig erkannt werde.

In einem anderen Sinne ergeben sich Schwellenwerte, wenn wir nicht die Geschwindigkeit, sondern die Exkursion einer Bewegung variieren, wobei dann zweckmäßig der Geschwindigkeit ein möglichst günstiger Wert gegeben werden sollte, übrigens streng genommen zu unterscheiden wäre, ob wir die Geschwindigkeit oder die Gesamtdauer konstant halten. Versuche dieser Art sind neuerdings von BASLER[4] mitgeteilt worden. Er gelangte zu dem theoretisch beachtenswerten Resultat[5], daß an der Stelle des deutlichsten Sehens Bewegungen von einem Umfange von nur 20 Sek. mit Sicherheit wahrgenommen werden[5], ein Betrag, der hinter dem kleinsten erkennbaren Abstand zweier Punkte erheblich zurückbleibt[6]. Die Dauer der Bewegung betrug etwa $^1/_{15}$ Sek. Schon früher ist die entsprechende Tatsache für die exzentrischen Netzhautteile von AUBERT[7] und EXNER[8] gefunden worden. EXNER insbesondere betonte die Fähigkeit der peripheren Netzhautteile, Verschiebungen wahrzunehmen, die

[1] Comptes rendus CII. S. 1155 u. 1462. 1886.

[2] Zeitschrift f. Psychologie XII. S. 313. 1896.

[3] La perception visuelle de l'espace. S. 178. 1902.

[4] PFLÜGERS Archiv CXV. 1906. S. 582. — Ebenda CXXIV. 1908. S. 313.

[5] Auch bei diesem Verfahren macht sich die Bedeutung ruhender Vergleichsobjekte sehr bemerklich. So fand BASLER, daß sich seine Schwellenwerte bei völligem Ausschluß solcher (Beobachtung im ganz verdunkelten Raum) etwa auf das 4fache erhöhten.

[6] Analog sind übrigens die Erscheinungen im Gebiete des Tastsinns, die von FREY und METZNER beobachtet wurden. Zeitschr. für Psychologie XXVI. S. 33. 1901 und XXIX. S 164. 1902.

[7] a. a. O.

[8] a. a. O.

kleiner sind als der kleinste an ruhenden Objekten noch unterscheidbare Abstand und legte in interessanter Weise dar, wie nach Maßgabe allgemeiner physiologischer Zwecke die Aufgabe der peripheren Netzhautteile gerade in dem Bemerken von Veränderungen besteht. Mit dieser Anschauung sind wohl die erwähnten Befunde BASLERS nicht im Widerspruche. Allerdings besteht auch für das Netzhautzentrum der gleiche Unterschied; auch hier kann eine Verschiebung wahrgenommen werden, deren Betrag kleiner ist als der für die Unterscheidung gleichzeitig gesehener Objekte erforderliche Abstand, doch ist dieser Unterschied für das Zentrum nicht so groß wie für die Peripherie. Das Distinktionsvermögen (so kann man diesen Sachverhalt auch ausdrücken) nimmt mit wachsendem Abstand vom Zentrum schneller ab als die Bewegungsempfindlichkeit, wie dies in einer direkt hierauf gerichteten Untersuchung von RUPPERT[1] gezeigt wurde.

Für Bewegungen von fixiertem Umfange werden wir endlich auch nach einem oberen Grenzwert der Geschwindigkeit bzw. der Dauer fragen können, da sich erwarten läßt, daß bei zu kurzer Dauer die Bewegung als solche nicht mehr erkannt, vielmehr der Gegenstand an den verschiedenen Stellen seiner Bahn gleichzeitig gesehen werden wird[2]. Ermittelungen dieser Art verdanken wir BOURDON. Er fand für direktes Sehen die Grenze bei Zeitwerten von 0,027—0,079 Sek. entsprechend Winkelgeschwindigkeiten von 3,5 und 1,4° in der hundertstel Sekunde[3], während für indirektes Sehen sich Werte von 0,023 und 0,061 Sek. (Winkelgeschwindigkeit von 4 und 1,8° für 0,01 Sek.) ergaben. Der ganze Umfang der Bewegung betrug etwa 10°. Beobachtungen ähnlicher Art sind übrigens schon von EXNER[4] angestellt worden. Dieser fand vor allem bemerkenswert, daß eine Bewegung schon wahrgenommen werden konnte, wenn ihre Gesamtdauer nur 0,014 Sek. betrug, während, wenn er zwei Punkte am Anfang und Ende der Bahn in eben diesem zeitlichen Abstande aufleuchten ließ, ihr Erscheinen als ungleichzeitig nicht erkannt werden konnte (hierfür war ein Intervall von 0,045 Sek. erforderlich).

Über die Unterschiedsempfindlichkeit für Bewegungseindrücke von mittleren Geschwindigkeiten sind von AUBERT[5] und BOURDON[6] Angaben gemacht worden. Ersterer fand einen Unterschied von etwa 1′ in der Sekunde wahrnehmbar (also etwa dem Betrage der Null-Schwelle), ein Ergebnis, das insofern jedenfalls etwas befremdet, als es die uns sonst überall bekannte Abhängigkeit des eben merklichen Unterschiedes von dem absoluten Betrag der zu vergleichenden Größen vermissen läßt. BOURDON fand zwei Geschwindigkeiten unterscheidbar, wenn sie um $^1/_{12}$ bis $^1/_8$ ihres Wertes differierten.

Endlich ist hier über die absolute Größe der Bewegungseindrücke noch

---

[1] Zeitschrift für Psychologie XLII. 1908. S. 409.

[2] Die in gewissem Sinne auch hierhergehörige Tatsache, daß schnell aufeinanderfolgende verschiedene Scheindrücke zu der Wahrnehmung eines einheitlichen und sich bewegenden Objekts verschmelzen können (wie dies den Stroboskopen, Kinematographen usw.) zugrunde liegt, ist von HELMHOLTZ in anderem Zusammenhange besprochen und wir verweisen daher auch mit bezug auf die diese Verhältnisse betreffenden neueren Erfahrungen auf die dort hinzugefügten Ergänzungen.

[3] a. a. O. S. 188. Die kleineren Werte wurden bei Benutzung eines größeren Gegenstandes, die höheren Werte bei kleinerem Gegenstande gefunden.

[4] EXNER, PFLÜGERS Archiv XI. 1875. S. 409.

[5] a. a. O.

[6] a. a. O. S. 192.

einiges anzuführen. In dieser Hinsicht betonte namentlich EXNER in seiner mehrerwähnten Arbeit, daß exzentrisch wahrgenommene Bewegungen beträchtlich überschätzt werden. Man hänge eine kleine Wagschale an einer etwa 2 m langen Schnur so auf, daß sie langsame Pendelbewegungen ausführen kann, stelle auf sie eine brennende Kerze und versetze das so hergerichtete Pendel in langsame Schwingungen. Beobachtet man diese zunächst mit stark exzentrischen Netzhautstellen und wendet ihnen dann den Blick zu, so ist man erstaunt, die Bewegung bei der genaueren Wahrnehmung an der Stelle des deutlichsten Sehens beträchtlich kleiner zu sehen, als sie im indirekten Sehen erschienen ist. — Aber auch die Art der Bewegungswahrnehmung ist auf die scheinbare Größe derselben von Einfluß. Eine mit der Stelle des deutlichsten Sehens beobachtete Bewegung erscheint nach den Beobachtungen FLEISCHLS[1] etwa doppelt so groß, wenn das Auge fixiert ist, somit das Bild über die Netzhaut hingleitet, als wenn das Auge dem Gegenstand folgt.

Als eigentümliche, mit dem Augenmaß für Bewegungen zusammenhängende Täuschungen schließen sich hier übrigens auch die sog. anorthoskopischen Erscheinungen an, für die sich aus der neueren Auffassung der Bewegungswahrnehmung wohl auch einigermaßen veränderte Gesichtspunkte ergeben dürften.

Von großem Interesse sind nun vor allem die an den Bewegungswahrnehmungen zu beobachtenden Kontrasterscheinungen. Es sind dies in erster Linie Erscheinungen von der Art des successiven Kontrastes, die, wie oben schon erwähnt, gegenwärtig im allgemeinen als Bewegungsnachbilder bezeichnet werden.

Wir berühren hiermit den Punkt, in dem wir von der von HELMHOLTZ vertretenen Anschauung abweichen müssen, da wir diese Erscheinungen nicht oder wenigstens nicht ausschließlich in der von ihm versuchten Weise auf Augenbewegungen zurückführen können. Betrachten wir (darin besteht ja der fundamentale Versuch dieser Art einige Zeit in gleicher Richtung sich bewegende Objekte, wie etwa die Wellen und kleinen schwimmenden Gegenstände auf der Oberfläche eines Flusses, und richten danach das Auge auf einen ruhenden Punkt, so scheint dieser in der entgegengesetzten Richtung zu gleiten. Stellen wir diesen Versuch ohne besondere Vorsichtsmaßregeln an, so wird allerdings in bekannter Weise das Auge beständig den bewegten Gegenständen ein Stück weit folgen, um dann wieder zurückzuspringen, und es erscheint daher auch möglich, das in diesem Falle eintretende Bewegungsnachbild auf eine Fortdauer dieser Art von Augenbewegungen zu beziehen. Aber es kann keinem Zweifel unterliegen, daß auch das andere Moment, das, wie wir sahen, den unmittelbaren Bewegungseindrücken zugrunde liegen kann, das Gleiten der Netzhautbilder, ein Bewegungsnachbild zu liefern vermag. In der einfachsten Weise läßt sich dies prüfen, wenn man einen Versuch ähnlicher Art mit der Modifikation anstellt, daß das Auge den bewegten Gegenständen nicht folgt, vielmehr eine feste Marke dauernd fixiert. Nach den übereinstimmenden Befunden zahlreicher Beobachter kann nicht daran gezweifelt werden, daß die Erscheinung des Bewegungsnachbildes auch unter diesen Umständen mit vollkommener Deutlichkeit wahrgenommen werden kann.

Wenn hier die Befunde von HELMHOLTZ in positivem Widerspruch zu dem stehen, was später ganz allgemein konstatiert worden ist, so ist es erfreulich, daß

[1] Sitzungsberichte der Wiener Akademie. Math.-naturwiss. Kl. (3) LXXXVI. 1882.

wir den Grund dieses Widerspruches mit einiger Wahrscheinlichkeit angeben können. Er liegt vermutlich darin, daß HELMHOLTZ seine Beobachtungen auf Fälle beschränkte, in denen die Geschwindigkeit der bewegten Gegenstände zu groß war. In der Tat sind die Erscheinungen gerade bei relativ langsamen Bewegungen am besten zu sehen, und werden unbemerkbar, wenn die Bewegung eine so schnelle ist, daß die Gegenstände verschwimmen und undeutlich werden. Von solcher Art sind aber z. B. meistens die Bewegungen der äußeren Gegenstände, wenn wir beim Fahren im Eisenbahnwagen ein Pünktchen der Fensterscheibe fixieren. Die Bemerkungen auf S. 208 (oben) lassen erkennen, daß HELMHOLTZ gerade auf die Beobachtung unter solchen und ähnlichen Bedingungen sich beschränkt hat.

Man könnte ja nun bei diesen Beobachtungen allenfalls die Einmischung ungewollter und unbemerkter Augenbewegungen vermuten; und man könnte sogar äußersten Falles an Rollbewegungen des Auges denken, wenn nach der Fixierung der Mitte einer rotierenden Scheibe als Nachbild eine entgegengesetzt gerichtete Drehung bemerkt wird. Ganz ausgeschlossen ist dagegen eine Erklärung auf dieser Grundlage, wenn wir nach Betrachtung von Bewegungen die in allen Teilen des Gesichtsfeldes radial gegen den Fixationspunkt hin oder von ihm fort gerichtet sind, nun auch ein entsprechendes, überall radial gerichtetes Bewegungsnachbild konstatieren.

Die Tatsachen lehren demnach unzweideutig, wie dies insbesondere von EXNER[1] dargelegt worden ist, daß ganz ebenso wie die auf dem Folgen des Blickes beruhenden Bewegungseindrücke, so auch das Gleiten der Netzhautbilder ein Nachbild hinterläßt derart, daß das in Wirklichkeit auf der gleichen Netzhautstelle verharrende Bild uns den Eindruck einer entgegengesetzt gerichteten Bewegung hervorruft. Und wir können dieser Regel auf Grund der letzterwähnten Erscheinungen hinzufügen, daß in dieser Hinsicht die verschiedenen Netzhautteile in gewissem Maße voneinander unabhängig sind, so daß das Bewegungsnachbild für jede einzelne sich durch die an ihr selbst zuvor stattgefundenen Bildverschiebungen bestimmt.

Wir schließen dieser Feststellung der Grundtatsache eine Anzahl speziellerer Ermittelungen an, die in bezug auf die Bewegungsnachbilder gemacht sind. BORSCHKE und HESCHELES[2] zeigten, daß wenn man über dieselbe Netzhautstelle gleichzeitig Bilder in verschiedener Richtung gleiten läßt, das Bewegungsnachbild sich in einer etwa dem Kräfteparallelogramm vergleichbaren Weise aus den Erfolgen der einen und der anderen Bewegung zusammensetzt. Messende Beobachtungen des Bewegungsnachbildes haben CORDS u. v. BRÜCKE[3] angestellt; sie verfuhren zu dem Ende so, daß nach Erzeugung eines Bewegungsnachbildes dem Auge nicht ruhende, sondern wiederum bewegte Gegenstände dargeboten wurden, und zwar von gleichgerichteter geringerer, übrigens passend veränderlicher Geschwindigkeit In einer Reihe von Versuchen mit übereinstimmender Vorbildbewegung ließ sich dann ermitteln, bei welcher Geschwindigkeit das Bewegungsnachbild durch die objektive Bewegung des betrachteten Gegenstandes gerade kompensiert wurde, dieser also ruhend erschien. Die genannten Beobachter fanden Nachbild-

[1] EXNER, Einige Beobachtungen über Bewegungsnachbilder. Zentralblatt für Physiologie I. 1887. S. 135. — Zeitschrift für Psychologie XXI. 1892. S. 388.
[2] Zeitschrift für Psychologie XXVII. 1902. S. 387.
[3] PFLÜGERS Archiv CXIX. 1907. S. 54.

geschwindigkeiten von etwa 3 Minuten bis zu einem Grad in der Sekunde. Sie wuchsen mit der Geschwindigkeit des Vorbildes nur bis zu einem gewissen optimalen Wert, jenseits dessen sie wieder abnahmen.

Was den simultanen Kontrast auf diesem Gebiet anlangt, so könnte man geneigt sein, dahin die sehr bekannte Erscheinung zu rechnen, daß z. B. die am Mond vorbeiziehenden Wolken diesen bewegt erscheinen lassen. Mir will indessen diese Auffassung doch nicht als zutreffend erscheinen. Fixieren wir den Mond, so ist der Eindruck, daß er sich bewegt, m. E. nicht als eine durch die im Gesichtsfeld gleitenden Wolken hervorgebrachte Kontrastwirkung zu betrachten; vielmehr tritt zufolge der gegebenen Umstände eine Modifikation desjenigen Faktors ein, der für die Wahrnehmung des ganzen Gesichtsfeldes mitbestimmend ist; psychologisch gesprochen, wir werden zu der Täuschung veranlaßt, das Auge für bewegt zu halten, während es in Wirklichkeit stillsteht, oder umgekehrt (wenn wir eine Wolke fixieren). Demgemäß erscheint ja denn auch die Bewegung der Wolken nicht etwa verstärkt, wie es bei einem Kontrastverhältnis der Fall sein müßte, sondern diese erscheinen als stillstehend. Was sich hier bemerklich macht, ist also m. E. keine Kontrasterscheinung, sondern eine andersartige Beeinflussung eines die gesamten Wahrnehmungen übereinstimmend mitbestimmenden Faktors.

Als wirklichen Simultankontrast im Gebiete der Bewegungseindrücke können dagegen gewisse von v. SZILY[1] beschriebene Erscheinungen gelten. Auf den Zusammenhang der beiden Augen in bezug auf die Bewegungsnachbilder wird an späterer Stelle einzugehen sein.

2. Die hier besprochenen Erscheinungen des Drehschwindels haben wir auf Grund der den letzten Jahrzehnten angehörigen Erfahrungen über das statische Organ anders aufzufassen gelernt. Wir müssen hiernach annehmen, daß dieses uns in selbständiger Weise die Eindrücke von Bewegungszuständen unseres Körpers vermittelt. Speziell unter den hier in Rede stehenden Bedingungen entsteht in ausgeprägtester Weise das auf der Funktion des statischen Organs beruhende Schwindelgefühl und dieses ist es denn auch ohne Zweifel, was die Scheindrehung der gesehenen Gegenstände bewirkt. In welcher Weise dies des spezielleren geschieht, ist, wie mir scheint, nicht ganz sicher zu sagen. In erster Linie wird wohl anzunehmen sein, daß wenn wir den Eindruck haben, uns z. B. im Sinne des Uhrzeigers zu drehen, die unmittelbare Folge hiervon auch die ist, daß die gesehenen Gegenstände sich mit uns zu drehen scheinen.

Hierzu mag indessen wohl noch etwas anderes kommen. Die Beobachtungen des Drehschwindels haben ja keineswegs etwa gelehrt, daß die von HELMHOLTZ angenommenen Augenbewegungen nicht existierten; im Gegenteil, sie haben das Vorhandensein derselben mit voller Regelmäßigkeit erwiesen; wir sind nur dazu gelangt sie hinsichtlich ihrer Entstehung anders aufzufassen. Sie sind wohl schwerlich, wie HELMHOLTZ meinte, auf die Gewöhnung an einen gewissen Bewegungsmodus zurückzuführen, sondern sie sind unseren gegenwärtigen Anschauungen zufolge durch das Schwindelgefühl ausgelöste Reflexe. Auch solche reflektorisch ausgelöste Augenbewegungen werden aber ohne Zweifel so wirken, daß die dadurch hervorgerufenen Verschiebungen der Netzhautbilder als Schein-

[1] v. SZILY, Bewegungsnachbild und Bewegungskontrast. Ztschr. für Psychologie XXXVIII. S. 81.

bewegungen der gesehenen Gegenstände sich geltend machen. Es ist danach sehr möglich, daß den Augenbewegungen an den Scheinbewegungen der Sehobjekte beim Schwindel ein wesentlicher Anteil zukommt, wenn auch nicht wahrscheinlich, daß sie unerläßliche Bedingung dafür sind.

3. Daß wir, wie hier von HELMHOLTZ hervorgehoben wird, das Gesichtsfeld im ganzen im Verhältnis zu unserem Körper mit einer so außerordentlich geringen Sicherheit lokalisieren (psychologisch gesprochen die Stellung der Augen im Kopfe und des Kopfes zum übrigen Körper so unsicher beurteilen) macht sich noch in verschiedenen anderen Erscheinungen bemerkbar. Man kann sich von dem Grade der Genauigkeit ein Bild zu verschaffen suchen, indem man die optische mit der haptischen Lokalisation vergleicht, also sich etwa die Aufgabe stellt, einen gesehenen Gegenstand mit der Hand zu berühren. Natürlich ist dabei vor allem darauf zu achten, daß die Bewegung der Hand nicht etwa mit den Augen kontrolliert wird; man kann also so verfahren, daß man den Gegenstand, nachdem er mit dem Auge wahrgenommen worden ist, verschwindet und danach den Finger an die Stelle bringen läßt, wo der Gegenstand zuvor sichtbar war; oder auch so, daß man den Finger, während er an die geforderte Stelle gebracht wird, durch einen Schirm verdeckt. Es ist aber zu beachten, daß bei derartigen Versuchen die Präzision desjenigen Faktors, der durch die Augenstellungen bzw. die auf die Augenmuskeln wirkende Willensanstrengung gegeben ist, keineswegs rein zur Geltung kommt, vielmehr auch hier schon die optische Wahrnehmung der eigenen Körperteile in hohem Maße unterstützend wirkt, ein Umstand, auf den insbesondere E. FICK [1] die Aufmerksamkeit gelenkt hat. Prüft man behufs vollständiger Ausschließung dieses Hilfsmittels die Fähigkeit ein im sonst völlig dunkeln Raume allein sichtbares Pünktchen mit dem Finger zu treffen, so zeigt sich, daß dies nur in allerunvollkommenster Weise gelingt. Offenbar hängt mit dieser Unsicherheit auch die Möglichkeit der früher als autokinetische Empfindung erwähnten Erscheinung zusammen, nicht minder auch die bekannten, bei der Betrachtung von Mond und Wolken auftretenden Täuschungen. Weit sicherer ist die Wahrnehmung der vertikalen und der horizontalen Richtung, Verhältnisse auf die wir bei Besprechung des sogen. AUBERTschen Phänomens zurückkommen.

4. Ähnlich, wie unsere Auffassung des Drehschwindels, so ist auch die des hier besprochenen sogen. AUBERTschen Phänomens durch die neueren Erfahrungen über das statische Organ in hohem Grade beeinflußt worden. Wir haben hier von der Tatsache als grundlegend auszugehen, daß die jeweilige Richtung der Vertikalen (genauer gesagt der jeweiligen Beschleunigungskräfte) durch eine besondere eben an diesem Organ angreifende Wirkung physiologisch zur Geltung kommt; hierauf beruht die Möglichkeit, in jedem Augenblick annähernd richtig die Richtung der Vertikalen anzugeben, wie auch der Körper im Raume gerade orientiert ist. Stellen wir demnach die Aufgabe, bei verschiedenen Stellungen des Körpers eine gesehene oder getastete Linie in senkrechte Lage zu bringen, so drückt sich darin jedenfalls eine verwickelte Leistung aus, in die die Funktion des statischen Organs, aber vermutlich auch Tastempfindungen verschiedener Art eingehen. Eine speziell optische Bedeutung würde diesen Erscheinungen dann zukommen, wenn sich wahrscheinlich machen

[1] E. FICK, Die Verlegung der Netzhautbilder nach außen. Zeitschrift für Psychologie XXXIX. 1905. S. 102.

ließ, daß gewisse Abweichungen sich auf eine besondere Funktionsweise gerade des optischen Apparates zurückführen lassen. So kann man als besonders interessant die Frage aufwerfen, ob etwa (psychologisch ausgedrückt) die kompensatorischen Rollungen des Auges außer Betracht bleiben, d. h. der ursprünglich vertikale Meridian in derjenigen Neigung gesehen wird, die der Kopf bzw. das statische Organ wirklich besitzt. Wäre dies der Fall und käme dieser Umstand allein für die Täuschungen in Betracht, so müßte die in Wirklichkeit senkrechte Linie immer um den Betrag der kompensatorischen Rollung im entgegengesetzten Sinne dieser, d. h. also im Sinne der tatsächlichen Kopfneigung gedreht erscheinen. Dies ist nun aber keineswegs der Fall. Ob ein solches Verhältnis, wie wir es eben supponierten, besteht, ist daher sehr zweifelhaft; jedenfalls kann es für die Erscheinungen nicht allein bestimmend sein. Unter diesen Umständen liegt, wie mir scheint, Bedeutung und Interesse der ganzen Gruppe von Erscheinungen überwiegend in anderer Richtung, wie ja auch die Diskussion derselben sich ganz vorzugsweise auf das statische Organ gerichtet hat. Von einer genaueren Verfolgung des Gegensatzes darf daher an dieser Stelle abgesehen werden[1].

---

§ 30. Wahrnehmung der Tiefendimension.

Wir haben in den beiden vorangehenden Paragraphen beschrieben, wie sich die gesehenen Objekte in der Fläche des Sehfeldes scheinbar nebeneinander ordnen, und welche Momente auf die Art dieser Anordnung, die scheinbaren Abstände der einzelnen Objekte im Sehfelde Einfluß haben. Wir haben dabei allerdings zur Erleichterung der geometrischen Auffassung uns erlaubt für das Sehfeld die Gestalt einer Kugel anzunehmen, aber dabei ausdrücklich hervorgehoben, daß die scheinbare Anordnung im Sehfelde überhaupt eben nur eine flächenhafte Anordnung, nach zwei Dimensionen ausgedehnt, sei, aber keineswegs eine Anordnung auf irgend einer bestimmten Fläche, die ihre feste Lage und Größe hätte. Die Form dieser Fläche des Sehfeldes blieb vielmehr vollständig unbestimmt. Eben deshalb kann sie aber nun noch jede beliebige Form annehmen, sobald irgendwelche neue Momente der Wahrnehmung hinzutreten, die über eine solche Aufschluß geben.

Das einäugige Sehen gibt zunächst nur die Wahrnehmung der Richtung, in der der gesehene Punkt liegt. Dieser kann sich in der Visierlinie, in der er liegt, hin und her bewegen, ohne daß in dem Eindruck auf das Auge sich etwas ändert mit Ausnahme der Größe des Zerstreuungskreises, den er auf der Netzhaut erzeugt; und solange die Verschiebung die Länge von Czermaks Akkommodationslinie (s. Bd. I, S. 103) nicht überschreitet, wird diese Veränderung des Zerstreuungskreises gar keine wahrnehmbare Größe haben. Welche Fehler wir in der Wahrnehmung der Richtung einer solchen Visierlinie begehen, ist im vorigen Paragraphen auseinandergesetzt worden. Das einäugige Sehen gibt uns also zunächst weiter nichts als die scheinbare Richtung der Visierlinie, in der der gesehene Punkt zu suchen ist.

[1] Als Untersuchungen über das Aubertsche Phänomen mögen hier Erwähnung finden: W. A. Nagel, Zeitschr. f. Psychol. XVI. 1898. S. 373. — Sachs und Meller, Archiv f. Ophth. LII. (3) 1901. S. 387. — Dieselben, ebenda S. 7. — Dieselben, Zeitschr. für Psychologie XXXI. 1903. S. 59. — Feilchenfeld, ebenda XXXI. 1903. S. 127.

Um nun eine vollständige Kenntnis der wirklichen Verteilung der gesehenen Objekte im Raume zu erhalten, ist es weiter noch nötig, in der genannten Visierlinie auch den Abstand jedes gesehenen Punktes vom Auge zu kennen. Zur Kenntnis der Flächendimensionen des Feldes muß auch noch die Kenntnis seiner Tiefendimension kommen. Die tägliche Erfahrung lehrt uns, daß wir auch diese Tiefendimensionen beurteilen, bald mehr, bald weniger genau. Wir haben also zu untersuchen, auf welche Weise wir zur Kenntnis der Abstände der gesehenen Objekte von unserem Auge kommen.

Hierbei sind zweierlei Hilfsmittel zu trennen, die einen gehören der Erfahrung über die besondere Natur der gesehenen Objekte an und geben also nur Vorstellungen des Abstandes, die andern gehören der Empfindung an und geben eine wirkliche Wahrnehmung des Abstandes. Zu diesen letzteren gehören: 1. das Gefühl der notwendigen Akkommodationsanstrengung, 2. die Beobachtung bei bewegtem Kopf und Körper, 3. der gleichzeitige Gebrauch beider Augen.

Ehe wir untersuchen, wann und wieviel diese letztgenannten Hilfsmittel der Wahrnehmung leisten, wird es nötig sein die aus der Erfahrung genommenen Momente zu untersuchen, um abscheiden zu können, was diesen angehört. Diesen gehört alles an, was wir zu unterscheiden wissen in bezug auf die Tiefendimensionen des Gesichtsfeldes mit einem Auge, bei unbewegtem Kopfe, an Gegenständen, die weit genug entfernt oder so verwaschen gezeichnet sind, daß keine deutlich fühlbare Akkommodationsanstrengung für ihre Betrachtung stattfindet. Es kommt hierbei in Betracht erstens die mitgebrachte Kenntnis der Größe der gesehenen Objekte, dann die ihrer Form, ferner die Verteilung des Schattens, endlich die Trübung der vor ihnen liegenden Luft.

Derselbe Gegenstand aus verschiedener Entfernung geschehen gibt verschieden große Netzhautbilder und erscheint unter verschiedenen Gesichtswinkeln. Je entfernter er ist, desto kleiner der Gesichtswinkel, unter dem er erscheint. Wie also die Astronomen aus der Messung der wechselnden Gesichtswinkel, unter denen uns Sonne und Mond erscheinen, die Änderungen in der Entfernung dieser Gestirne berechnen können, so können wir aus dem Gesichtswinkel, oder was dem entspricht, aus der Größe des Netzhautbildchens eines gesehenen Gegenstandes von bekannter Größe, eines Menschen z. B., die Entfernung schätzen, in der er sich von uns befindet. Es sind namentlich Menschen und Haustiere, welche in dieser Beziehung wertvolle Merkzeichen in der Landschaft bilden, weil sie durch ihre Bewegung leicht erkennbar sind, nur wenig in der Größe wechseln und ihre Größe uns sehr gut bekannt ist. Namentlich Militärs pflegen gut geübt zu sein, auf den Abstand entfernter Truppenmassen auf unbekanntem Terrain in dieser Weise richtig zu schließen, so wie man denn auch zu militärischen Zwecken verschiedene kleine optische Apparate eingerichtet hat, mit denen man den Gesichtswinkel für die Höhe eines entfernten Mannes messen und danach seine Entfernung ablesen kann. Häuser, Bäume und Kulturpflanzen dienen demselben Zwecke weniger sicher, wegen ihrer weniger konstanten Größe, wobei denn auch gelegentlich starke Irrtümer unterlaufen. Ein Bewohner der Ebene hält Weinberge leicht für Kartoffelfelder, oder Tannen auf fernen hohen Bergen für Heidekraut, und schätzt danach die Entfernungen und Größen der Berge zu klein. Aus derselben Rücksicht brauchen die Maler Staffage von Menschen und Vieh in Landschaften, um die Größe der dargestellten Dinge einigermaßen kenntlich zu machen.

Damit hängt nun auch noch zusammen, daß dieselben Objekte, wie der Mond oder ferne Berge, wenn wir sie wegen trüberer Luft oder aus anderen Gründen für ferner halten, uns gleichzeitig auch immer in demselben Maße an Größe zu wachsen scheinen. Ferner die Erfahrung, daß ferne Teile der Landschaft, durch ein vergrößerndes Fernrohr gesehen, dem Beschauer in der Regel nicht vergrößert sondern nur genähert erscheinen, und er sich erst durch Öffnung des anderen Auges davon überzeugen muß, daß die Bilder auch vergrößert sind.

Da übrigens diese Beziehung zwischen Entfernung und Größe erst durch lange Erfahrung erlernt werden muß, wird es nicht auffallen können, daß Kinder hierin ziemlich ungeübt sind und leicht grobe Irrtümer machen. Ich selbst entsinne mich noch, daß ich als Kind an einem Kirchturm (der Garnisonkirche zu Potsdam) vorübergegangen bin und auf dessen Galerie Menschen sah, die ich für Püppchen hielt, und daß ich meine Mutter bat sie mir herunterzulangen, was, wie ich damals glaubte, sie können würde, wenn sie den Arm ausstreckte. Der Zug hat sich meinem Gedächtnisse eingeprägt, weil mir an meinem Irrtum das Gesetz der perspektivischen Verkleinerung deutlich wurde.

Zur Kenntnis der Größe kommt ferner in sehr vielen Fällen die Kenntnis der Form der gesehenen Objekte, namentlich in solchen Fällen, wo das eine zum Teil vom anderen gedeckt wird. Wenn wir z. B. in der Entfernung zwei Hügel sehen, von denen der eine mit seiner Basis sich vor den anderen vorschiebt und den letzteren zum Teil verdeckt, so schließen wir daraus unmittelbar, daß der deckende vor dem gedeckten liegt; denn wenn dies nicht der Fall wäre, so müßte der andere einen überstehenden Teil und eine nach unten sehende Begrenzungsfläche haben, wie sie an Hügeln nie vorkommt, und außerdem müßte der Zufall es mit sich bringen, daß diese überhängende Grenzlinie desselben gerade in der Konturlinie des anderen Hügels, wo dieser nicht deckt, ihre Fortsetzung fände. Es wäre dies eine an sich mögliche Auslegung des gesehenen Bildes, die aber aller Erfahrung widerspräche. Dasselbe kann natürlich bei allen möglichen Arten von Gegenständen vorkommen, die sich teilweise decken. Selbst wenn uns ihre Gestalt noch durchaus unbekannt ist, wird in den meisten Fällen der Umstand, daß die Konturlinie des deckenden Objekts, wo sie über die Konturlinie des bedeckten hingeht, ihre Richtung nicht ändert, entscheidend sein, um den deckenden von dem gedeckten Gegenstande zu unterscheiden. Man kann auch leicht Täuschungen hervorbringen, wenn man absichtlich ein deckendes Papierblatt so hält, daß es eine Ecke darbietet, wo es mit dem teilweise gedeckten zusammenstößt, an letzterm aber die Kontur in derselben Richtung fortläuft.

Am auffallendsten sind die Täuschungen, die auf diesem Prinzip beruhen, an spiegelnden und brechenden Flächen, die vor ihrer dem Beobachter zugekehrten Seite ein optisches Bild entwerfen. Die meisten Personen überzeugen sich nur schwer davon, daß dieses Bild vor dem Spiegel in der Luft liegt; denn sie sehen Lücken im Bilde, wo der Spiegel ein Fleckchen hat, sie sehen das Bild begrenzt durch den Rand des Spiegels, sie sehen überhaupt alle kleinen Unregelmäßigkeiten des Spiegelbelegs ungetrübt durch das Bild hindurch. Das Bild erscheint durchaus als der bedeckte, also hintere Gegenstand, während es in der Tat der vordere ist. Ja selbst, wenn man mit Hilfe des zweiäugigen Sehens, der Kopfbewegungen und der Akkommodation sinnliche Momente in das Spiel bringt, welche die Wahrnehmung des Bildes an seinem richtigen Orte

unzweideutig feststellen könnten, ist es nicht immer ganz leicht, sich von der Täuschung frei zu machen. Das beste Mittel ist noch, daß man in der Ebene des Bildes einen Schirm anbringt mit einem Ausschnitt, in dem das Bild erscheint, während der Rand der spiegelnden oder brechenden Fläche, die es entwirft, dadurch verdeckt wird. Dann sieht der Beobachter leicht, daß das Bild in der Ebene des Schirmes liegt.[1]

Es gehört hierher ferner auch die Erfahrung, daß subjektive Gesichtserscheinungen bei geöffneten Augen immer auf die Fläche der im Gesichtsfelde sichtbaren körperlichen Objekte projiziert erscheinen. Da sie bei Bewegungen des Auges sich mitbewegen, werden sie gleich als subjektive Erscheinungen von den objektiven getrennt, und es wird ihnen keine Realität zugeschrieben, sondern sie erscheinen nur als Flecken auf den reellen Objekten, wenn die Aufmerksamkeit ihnen überhaupt zugewendet wird. Dies geschieht in der Regel sogar dann, wenn binokulare Nachbilder in beiden Augen entwickelt sind, welche die Wahrnehmung einer bestimmten Lokalisation im Raume möglich machen würden. Auch solche ist man meist geneigt auf die gesehenen reellen Objekte zu projizieren, statt eine stereoskopische Raumanschauung von ihnen auszubilden, und nur bei besonders darauf gerichteter Aufmerksamkeit gelingt das letztere.

In vielen Fällen genügt es zu wissen oder zu vermuten, daß der gesehene Gegenstand eine Form von gewisser Regelmäßigkeit hat, um sein perspektivisches Bild, wie es uns entweder das Auge oder eine künstlich gefertigte Zeichnung zeigt, richtig als Körperform zu deuten.[2] Wenn ein Haus, ein Tisch oder andere von Menschen gefertigte Gegenstände dargestellt sind, dürfen wir voraussetzen, daß deren Winkel rechte sind und deren Flächen Ebenen oder zylindrische und kugelige Flächen. Das genügt, um nach einer richtigen perspektivischen Zeichnung sich richtige Anschauungen des Objekts zu bilden. Eine perspektivische Zeichnung eines Hauses oder eines physikalischen Apparates verstehen wir ohne Schwierigkeit, selbst wenn sie recht verwickelte Verhältnisse darstellt. Ist sie gut schattiert, so wird der Überblick noch leichter. Aber die vollkommenste Zeichnung oder selbst Photographie eines Meteorsteines, eines Eisklumpens, mancher anatomischen Präparate und ähnlicher unregelmäßiger Gegenstände gibt kaum ein Bild ihrer körperlichen Form. Namentlich Photographien von Landschaften, Felsen, Gletschern bieten dem Auge oft nichts als ein halbverständliches Gewirr grauer Flecken, während dieselben Photographien bei passender stereoskopischer Kombination die allerschlagendste Naturwahrheit wiedergeben.

Wenn dergleichen regelmäßig gebildete Produkte menschlichen Kunstfleißes, deren Grundformen rechtwinkelige Parallelepipede, Zylinder und Kugelflächen sind, aus der Nähe betrachtet werden, so daß die vorderen Teile in einem deutlich größeren Maßstabe auf der Netzhaut sich abbilden als die hinteren, so läßt eine richtige perspektivische Abbildung derselben meist nur eine Deutung zu, und wir kommen nicht in Verlegenheit zu erkennen, welches die vorderen, welches die hinteren Teile sind. Werden sie aus großer Ferne gesehen, oder sind sie sehr flach im Relief, so kann es aber zweifelhaft werden, wie sie zu deuten sind. Dahin gehört die von Sinsteden[3] an einer Windmühle gemachte

[1] Darüber siehe Dove in Poggendorffs Annalen LXXXV.
[2] Recklinghausen, Im Archiv für Ophthalmologie V, 2. S. 163.
[3] Poggendorffs Annalen CXI, 336—339. Mohr ebenda 638—642.

Beobachtung, die sich des Abends gegen den hellen Himmel projizierte, so daß sie nur wie in einer Silhouette halb von der Seite erschien, als gleichmäßig dunkles Objekt auf hellem Grunde, und nur ihre Umrißlinie sichtbar war. Er beobachtete nämlich, daß die Flügel der Mühle bald in der einen, bald in der anderen Richtung herumzugehen schienen. Bei einem solchen Anblicke bleibt es nämlich unentschieden, ob die Frontseite der Mühle, welche die Flügel trägt, oder die Rückseite dem Beobachter zugekehrt ist, und ob er also die Flügel selbst schräg von vorn oder von hinten sieht. Sähe er sie von vorn, so würde die perspektivisch der Mühle zugekehrte Seite der Flügel ihm die nähere sein; sähe er sie von hinten, so würde diese ihm die fernere sein. Je nachdem er die eine oder andere Auslegung wählt, scheint die ihm zugekehrte Seite der Flügel bei der Drehung aufzusteigen oder abzusteigen, und er erhält also beim Wechsel der Deutung des Bildes auch eine scheinbar umgekehrte Bewegung der Flügel. Ob man nun in die eine oder andere Deutung der Erscheinung verfällt, hängt zunächst scheinbar vom Zufall ab. Auch lassen sich die Gründe, warum die Erscheinung oft plötzlich wechselt, nicht immer ermitteln; dagegen kann man auch willkürlich den Wechsel herbeiführen, nämlich dadurch, daß man sich das entgegengesetzte Verhalten der Mühle lebhaft vorstellt. So wie man dann den sinnlichen Eindruck als vollkommen übereinstimmend mit dieser Vorstellung wahrnimmt, tritt die Vorstellung als sinnliches Anschauungsbild ein.

Es gehört hierher auch folgende von SCHROEDER[1] angegebene Figur, welche ohne Schattierung in Fig. 49 wiedergegeben ist. Dieselbe wird zuerst und am leichtesten als die geometrische Projektion einer Treppe aufgefaßt werden, so daß die mit *a* bezeichnete Fläche dem Beschauer näher ist, als die mit *b* bezeichnete, welche letztere die Wand darstellt, an die die Treppe sich anlehnt. Sie kann aber auch so aufgefaßt werden, als sähe man ein überhängendes Mauerstück *b*, welches nach unten und links treppenförmig endet, so daß die Fläche *b* näher, *a* ferner wäre und der Beobachter von unten und links her nach der treppenförmigen Fläche schaut. Die erstere Deutung ist uns die geläufigere, und sie tritt deshalb meist zuerst ein, doch schlägt sie auch leicht und ohne bestimmt zu bezeichnenden Grund in die zweite um. So wie ich mir aber lebhaft die eine oder andere Körperform vorstelle, so tritt auch sogleich die Anschauung derselben an der Figur hervor. Gelingt es nicht von selbst aus der ersten Anschauung in die zweite überzugehen, so kann man das, wie SCHROEDER bemerkt, dadurch bewirken, daß man das Buch langsam umdreht, bis das untere Ende desselben nach oben gekehrt ist, und während der ganzen Zeit die Figur betrachtet. Dann bleibt die Fläche *a*, die einmal dem Beschauer näher vorgestellt wird, ihm fortdauernd die nähere, und nach einer Drehung um 180° hat man genau dieselbe Figur wieder, wie im Anfang, nur daß die Buchstaben *a* und *b* ihre Lage vertauscht haben, und daß nun scheinbar die rechts oben gelegene senkrechte Fläche die nähere geworden ist. Bei SCHROEDER

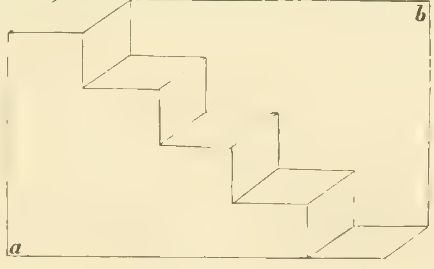


Fig. 49.

[1] POGGENDORFFS Annalen CV, 298.

ist dieselbe Figur in zweierlei Weise schattiert, was den Erfolg weiter nicht verändert.

Ähnliches kann man an einer großen Zahl perspektivischer Linienzeichnungen z. B. solchen, welche regelmäßige Körper, Kristallmodelle usw. in geometrischer Projektion (also wie von einem unendlich entfernten Punkte aus gesehen) darstellen, beobachten. Dieselbe Ecke oder Kante kann bald einspringend, bald ausspringend erscheinen. Oft wechselt die Vorstellung unwillkürlich. Ich finde aber, daß man sie auch immer willkürlich wechseln lassen kann, wenn man lebhaft eine andere Deutung sich vorstellt.

Es schließen sich hieran die Beobachtungen über die scheinbare Umkehrung des Reliefs von Matritzen für Medaillen, wobei indessen auch die Beschattung einen Einfluß ausübt. Wenn man von einer Medaille, welche in ziemlich flachem Relief geschnitten ist, einen Abguß in Gips oder Stearin macht, der also eine Matritze darstellt, an der alle konvexen Krümmungen des Originals konkav, alle hervorragenden Teile vertieft erscheinen, und man diese Matritze so legt, daß sie von schräg überfallendem Tageslicht beleuchtet wird, und also kräftig schattiert erscheint, so glaubt man, mit einem Auge danach hinsehend sehr leicht eine Patritze zu sehen von der ursprünglichen Form der Medaille. Sieht man mit beiden Augen gleichzeitig nach der Matritze hin, so schwindet in der Regel die Täuschung; ebenso wenn man den Kopf oder die Form hin- und herbewegt. Je ruhiger Auge und Objekt sind, desto leichter tritt die Täuschung ein. Namentlich ist sie unter den angegebenen Umständen fast unvermeidlich, wie SCHROEDER besonders hervorgehoben hat, wenn das Relief einen menschlichen Kopf oder Körper, oder auch tierische Formen, Blätter und dergleichen darstellt. Bei bloßen Buchstaben und Ornamenten bleibt die Täuschung viel leichter aus.

Dabei tritt nun eine eigentümliche Täuschung auch betreffs der Beleuchtung ein. Eine Hohlform nämlich zeigt die Schatten an der dem Fenster zugekehrten Seite, die Lichter an der abgekehrten; eine erhabene Form umgekehrt.

Wenn uns daher die Matritze als Patritze erscheint, so erscheint sie auch gleichzeitig von der dem Fenster entgegengesetzten Seite her beleuchtet zu sein. Dazu kommt nun noch, daß eine so schräg beleuchtete erhabene Form einen merklichen Schlagschatten auf den ebenen Grund werfen müßte, welcher Schlagschatten natürlich an der verkehrt gesehenen Matritze fehlt. Dadurch entsteht, wie SCHROEDER es nennt, eine Art magischer Beleuchtung des Reliefs, die gleichsam aus dem Innern zu kommen scheint. Die Ursache davon scheint mir zu sein, daß der Schlagschatten auf dem ebenen Grunde fehlt, und daher dieser Grund wie transparent beleuchtet erscheint.

Man kann übrigens, wie schon RITTENHOUSE und nach ihm viele andere bemerkten, die Täuschung erhöhen und erleichtern dadurch, daß man auch die Beleuchtung der Matritze umkehrt. Entweder, wie OPPEL in seinem Anaglyptoskop[1] getan hat, dadurch, daß man das Licht des Fensters durch einen Schirm abhält und dafür einen Spiegel an der entgegengesetzten Seite anbringt, den der Beobachter nicht bemerkt; dann erscheint die scheinbare Patritze vom Fenster her beleuchtet zu sein. Oder man kann die Matritze durch ein spiegelndes rechtwinkeliges Prisma betrachten oder durch eine Linse, die ein umgekehrtes Bild von ihr entwirft. In allen diesen Fällen erscheint

---

[1] POGGENDORFFS Annalen XCIX, 466—469.

die Beleuchtung richtig, obgleich sie immer etwas fremdartiges durch den fehlenden Schlagschatten behält, namentlich wenn das Relief sehr stark ist. Die Beobachtung durch eine umkehrende Linse trennt außerdem für den Beobachter die Form aus ihrer übrigen Umgebung los und erfordert eine unveränderliche Lage des Auges, weil das Bild der Medaille sonst von der Grenze der Linse verdeckt wird. Alle diese Umstände begünstigen die Täuschung. Daher ist es wohl zu erklären, daß man sie bei solchen umgekehrten von Linsen und Spiegeln entworfenen Bildern zuerst wahrgenommen hat.

Daß es im ganzen viel seltener gelingt, Patritzen als scheinbare Matritzen zu sehen, scheint nur davon herzurühren, daß jene gewöhnlich einige Schlagschatten zeigen, welche die Deutung der konvexen als eine hohle Form unmöglich machen.

Eine eigentümliche hierher gehörige Täuschung beschreibt D. Brewster.[1] Fußtapfen im Sande erschienen ihm erhöht. Es zeigte sich, daß der Wind helleren Sand hineingeweht und an einem Rande aufgehäuft hatte, so daß dieser Rand scheinbar stärker beleuchtet erschien. Auch der Mond, bei Tage durch ein umkehrendes Fernrohr betrachtet, erscheint, wie Schweizer bemerkt, zuweilen in verkehrtem Relief.

Schroeder macht noch auf einige andere Täuschungen ähnlicher Art aufmerksam. Wenn wir ein rechteckiges Streifchen Papier auf eine horizontale Tischplatte legen und schräg von oben her mit einer umkehrenden Linse besehen, so sollte bei richtiger Umkehrung der obere Rand des Bildes vom Papier und der Tischplatte dem Beobachter näher erscheinen, der untere ferner. Der Regel nach verhält es sich umgekehrt, wir glauben vielmehr den Tisch und das Papier in ihrer wirklichen Richtung zu sehen, und wenn eine feine Nadel schräg in das Papier eingestochen wird, von der eine passend gestellte Lampenflamme einen scharf begrenzten Schlagschatten wirft, so erscheint uns vermöge derselben Umkehrung oft das Bild des Schattens als das der Nadel und umgekehrt. Brewster bemerkt, daß bei dieser Art der Täuschung ein in die Ebene eingeschnittenes Intaglio wegen der Umkehrung leicht als Relief hervortritt, weil man die nähere Seite desselben für die entferntere hält.

Von noch größerer Wichtigkeit, als die verschiedenartige Beleuchtung der Flächen eines Körpers je nach ihrer Neigung gegen die einfallenden Strahlen, sind die Schlagschatten. Wenn wir eine erleuchtete Fläche sehen, so muß sich der leuchtende Körper vor dieser Fläche befinden, und wenn ein Schlagschatten auf sie fällt, so muß sich der Schatten werfende Körper ebenfalls vor der Fläche befinden, die den Schatten empfängt. (Vor und hinter ist hier in Beziehung auf die Fläche zu nehmen, nicht in Beziehung auf die Stellung des Beobachters.) Dadurch ist also eine gewisse geometrische Beziehung des Schatten werfenden Körpers zur beschatteten Fläche unzweideutig festgestellt. Eine wie entscheidende Rolle die Schlagschatten in der Deutung der Gesichtserscheinungen spielen, werden wir später bei den pseudoskopischen Erscheinungen noch ersehen. Auch ist allgemein bekannt, eine wie viel deutlichere Vorstellung eine gut schattierte Zeichnung von einem Gegenstande gibt, als eine, die bloß seine Umrisse darstellt; wie viel vorteilhafter für eine Landschaft, namentlich wenn man sie aus der Höhe sieht, die Beleuchtung des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs ist, als die der hochstehenden Sonne. Es kommen hier

[1] *Athenaeum* 1860. II. p. 24. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. II. p. 7—8.

nicht bloß die reicheren Farben in Betracht, welche die tief stehende Sonne gibt, sondern auch namentlich die bessere Modellierung der Formen des Terrains, welche durch die reichere Schattierung entsteht. Im allgemeinen sind ja wenige Abhänge so steil, daß sie bei hochstehender Sonne nicht beleuchtet wären. In der Mittagsbeleuchtung ist daher mit wenigen Ausnahmen alles hell und wenig Schatten vorhanden; die Formen der Berge und Täler, wo sie nicht sehr schroff sind, sind deshalb wenig deutlich. Wenn dagegen die Sonne schräg steht und viele Abwechslung von Licht und Schatten gibt, so wird alles viel deutlicher und verständlicher.

Ein weiteres von der Beleuchtung hergenommenes Moment für die Beurteilung der Entfernung namentlich entfernterer Gegenstände gibt die sogenannte Luftperspektive. Wir verstehen darunter die Trübung und Farbenveränderung des Bildes ferner Objekte, welche durch die unvollkommene Undurchsichtigkeit der vor ihnen liegenden Luftschicht bewirkt wird. Die Luft, wenn sie schwach mit Wassernebel gefüllt ist, wie es in ihren tieferen Schichten, namentlich in der Nähe großer Wasserflächen, gewöhnlich der Fall ist, wirkt wie ein trübes Medium, welches beleuchtet vor dunklem Hintergrunde selbst bläulich erscheint, eindringendes Licht heller Objekte aber mit rötlicher Farbe durchläßt. Je dicker die Luftschicht zwischen dem Auge des Beobachters und dem fernen Objekte ist, desto stärker wird dessen Farbe verändert, entweder in das Bläuliche, wenn es dunkler, oder in das Rötliche, wenn es heller als die vorliegende Luftschicht ist. So erscheinen ferne Berge blau, die untergehende Sonne rot.

Den Einfluß, den die Luftperspektive auf unser Urteil ausübt, können wir leicht bemerken, wenn die Luft ungewöhnlich klar oder ungewöhnlich trüb ist. Im ersteren Falle erscheinen ferne Bergreihen sehr viel näher und kleiner, im zweiten ferner und größer als gewöhnlich. Für den Bewohner der Ebene beruht darauf eine gewöhnliche Art der Täuschung, wenn er in das Hochgebirge kommt. In der Ebene, namentlich in der Nähe großer Wasserflächen, ist die Luft gewöhnlich trüb, im Hochgebirge gewöhnlich außerordentlich durchsichtig. So erscheinen denn dem Reisenden entfernte Berggipfel, namentlich wenn sie mit Schnee bedeckt im Sonnenschein glänzen, so klar, wie er sonst nur nahe Gegenstände gesehen hat, und er schätzt deshalb im allgemeinen alle Distanzen und Höhen viel zu klein, bis er, ihre Dimensionen selbst durchmessend, durch Anstrengung und Erfahrung eines Bessern belehrt wird.

Hierher gehört auch die berühmte Frage, warum der Mond nahe dem Horizonte größer aussieht, als wenn er hoch am Himmel steht, trotzdem er wegen der atmosphärischen Strahlenbrechung im vertikalen Durchmesser dort eigentlich kleiner aussehen sollte. Daß er am Horizonte größer erscheint, weil er uns dort weiter entfernt erscheint, haben schon Ptolemaeus und die arabischen Astronomen[1] richtig gewußt. Die eigentliche Frage ist also, warum erscheint uns das Himmelsgewölbe am Horizonte entfernter als im Zenith. Es sind eine Menge Motive dafür angeführt worden, warum dies so sei; ich glaube auch, daß nicht nur eines, sondern viele verschiedene Motive dahin zusammenwirken, wobei freilich schwer auszumitteln ist, welches das überwiegende in jedem einzelnen Falle sei.

[1] Montucla, *Histoire des Mathém.* Vol. I, S. 309 u. 352. — Rogeri Baconis, Perspekt. S. 118. — Porta, De refractione. p. 24, 128. — Priestley, Geschichte der Optik. Periode 6. Kap. 8.

Zunächst ist zu bedenken, daß kein entscheidender Grund da ist, warum der Sternenhimmel uns als eine regelmäßige Kugelfläche erscheinen sollte. Er zeigt unendlich entfernte Objekte; daraus folgt nur, daß er als irgendwelche Fläche von unbestimmter Form erscheinen kann, wenn irgendwelche andere Motive ihm eine solche zuweisen. Wenn wir im leeren Raume schwebten und ihn gleichzeitig und gleichmäßig in seiner ganzen Ausdehnung überschauen könnten, oder wenn seine Bewegung so schnell wäre, daß wir eine wirkliche sinnliche Anschauung davon erhalten könnten, möchte mehr Grund sein, ihn gerade als Kugelfläche anzuschauen. So aber ist in der Tat seine scheinbare Richtung und Gestalt eine sehr wechselnde, je nachdem das Stück, was wir von ihm sehen, von verschiedenen irdischen Gegenständen eingefaßt ist, und wir einen höheren oder tieferen Punkt fixieren. Wir werden später noch sehen, daß wir eine Neigung haben, ihn bei ruhiger binokularer Fixation eines Punktes für eine auf die jedesmaligen Blicklinien senkrechte Ebene zu halten.

Ganz anders ist es mit dem Wolkenhimmel. Die Wolken sind meistens zwar auch weit genug von uns entfernt, daß wir mittels der Erkennungsmittel, welche das zweiäugige Sehen und die Bewegung unseres Körpers uns gewähren, nichts oder so gut wie nichts über ihre Entfernung ausmachen können. Aber sie sind oft parallelstreifig, sie bewegen sich meistens in gleicher Richtung und mit konstanter Geschwindigkeit über das Himmelsgewölbe hin, sie erscheinen in der Nähe des Horizontes strichförmig, von der hohen Kante gesehen und so beleuchtet, daß man sie als perspektivisch verkürzte horizontal gedehnte Körper erkennen kann. Alles das kann dazu dienen, uns erkennen zu machen, daß die wahre Form des Wolkenhimmels wenigstens im Zenith ein sehr plattes Gewölbe ist. Am Horizont freilich verlassen uns diese Hilfsmittel, und da erscheinen dann die Wolken wie die Berge gleichmäßig auf eine von unten nach oben ansteigende und allmählich sowohl in den Erdboden, wie in das Himmelsgewölbe übergehende Fläche gemalt zu sein. Da wir nun kein Mittel der sinnlichen Anschauung haben, um die Entfernung des Wolkenhimmels von der des Sternenhimmels zu trennen, so scheint es nur natürlich, daß wir dem letzteren die wirkliche Form des ersteren, soweit wir sie unterscheiden können, mit zuschreiben, und daß auf diese Weise die doch immer sehr vage, unbestimmte und veränderliche Vorstellung von der flach kuppelförmigen Wölbung des Himmels entsteht.

Recht entschieden und überraschend tritt übrigens die Vergrößerung des Mondes oder der Sonne nur dann auf, wenn die Luft am Horizont recht dunstig ist und die genannten Himmelskörper nur noch eine geringe Lichtstärke zeigen. Dann haben wir an ihnen dieselbe Wirkung wie an fernen Bergen, sie sehen viel entfernter als bei klarer Luft und deshalb größer aus. Auch verstärken passende irdische Objekte am Horizont die Wirkung sehr. Wenn der Mond z. B. neben oder hinter einer etwa 2000 Fuß entfernten Baumkrone untergeht, welche selbst 20 Fuß Durchmesser hat, so erscheint er unter demselben Gesichtswinkel, aber viel weiter entfernt, also auch viel größer als der Baum; während er hinter flachem Horizonte untergehend keinen Gegenstand zur Vergleichung findet, an dem wir erkennen könnten, daß seine geringe scheinbare Größe einer sehr bedeutenden absoluten Größe entspricht.

Wenn man mittels einer planparallelen Glastafel ein Reflexbild des Mondes entwirft, welches scheinbar nahe am Horizonte gelegen ist, so finde ich nicht, daß dasselbe entschieden größer aussieht, als der direkt gesehene Mond oben

am Himmel, obgleich man die scheinbare Größe des reflektierten Mondes dann leicht mit den gleichzeitig gesehenen irdischen Körpern vergleichen kann. Es fehlt aber dem Spiegelbilde das Aussehen, als sei es durch den dunstigen Teil der Atmosphäre gesehen.

Auch scheint mir, daß die scheinbare Vergrößerung am Horizonte viel bemerklicher am Monde auftritt, als an der Sonne, die, wenn man ihre Gestalt überhaupt noch erkennen kann, gewöhnlich auch noch hell genug ist, daß man sie nicht ganz bequem betrachten kann, und daß sie also auch nicht unmittelbar mit den irdischen Objekten des Horizonts auf eine Linie gestellt werden kann. Bei recht klarem Himmel ist aber die Täuschung auch für den Mond nicht gerade sehr evident. Sie hängt immer in sehr hohem Grade vom Zustande der Atmosphäre ab.*

Die bisher genannten Motive sind es allein, welche die Maler benutzen können, um durch flächenhafte Zeichnungen und Gemälde eine Vorstellung von den dargestellten körperlichen Objekten zu geben. Leichter ist ihre Aufgabe, wo es sich um Objekte von wohlbekannter oder von geometrisch regelmäßiger Form handelt, ersteres namentlich bei menschlichen und tierischen Gestalten, letzteres bei Häusern, Geräten und anderen Erzeugnissen menschlichen Kunstfleißes. Bei solchen ist eine richtige perspektivische Zeichnung schon meistens ausreichend und kann durch eine richtige Schattengebung sehr lebendig gemacht werden. In der Kunst der kräftigen Schattengebung, welche die Körperform so sehr deutlich heraustreten läßt, sind bekanntlich die alten Meister des Porträtierens so ausgezeichnet gewesen. Ein allseitig beleuchtetes, schwach beschattetes Gesicht, noch so richtig dargestellt, gibt einen lebhaften Eindruck allenfalls, solange man die dargestellte Person noch oft sieht, aber es verliert seine Lebendigkeit bald, wenn dies nicht mehr geschieht. Schwieriger ist die Aufgabe des Malers, wenn er Naturgegenstände von unregelmäßiger Form darzustellen hat, Landschaften, Berge, Felsen. Die Staffage mit Menschen, Tieren, Bäumen, Häusern gibt dann ein wichtiges äußerliches Hilfsmittel ab, um die Entfernung der dargestellten Objekte ungefähr zu bezeichnen. Luftperspektive aber und Schatten sind die Hauptmittel. Daher ist nicht jede Beleuchtung einer Landschaft zur Darstellung geeignet. Ein gewisser Grad der Trübung der Luft und eine niedrig stehende Sonne, welche viel Wechsel von Schatten und Licht hervorbringt, sind wesentliche Erfordernisse, um nur die Formen der Landschaft deutlich werden zu lassen, abgesehen von den reicheren und mannigfacheren Färbungen, die auch ihre Schönheit erhöhen.

Die bisher beschriebenen Motive der Tiefenanschauung sind auch in psychologischer Beziehung interessant und wichtig, weil sie zeigen, welchen Einfluß die Erfahrung auf unsere scheinbar ganz unmittelbar und ohne Hilfe geistiger Tätigkeiten gewonnenen Sinneswahrnehmungen hat. Die Gesetze der Beleuchtung, des Schlagschattens, der Lufttrübung, der perspektivischen Darstellung und Deckung verschiedener Körper, die Größe der Menschen und Tiere usw. können wir erst durch Erfahrung kennen gelernt haben; wenigstens hat noch kein Verteidiger der angeborenen Anschauungen ihre angeborene Ursprünglichkeit zu behaupten gewagt, und für einige derselben, welche längere Einübung erfordern, kann man, wie oben bemerkt, bei Kindern direkt nachweisen, daß sie nicht angeboren sind. Und doch genügen diese Momente in

---

* Über die Täuschungen in bezug auf die Größe der Himmelskörper vgl. Anm. 1 am Schlusse des Paragraphen. K.

vielen Verhältnissen, um eine Anschauung der räumlichen Formen und Verhältnisse von vollkommener sinnlicher Lebhaftigkeit hervorzurufen, ohne daß irgendein Bewußtsein davon in uns rege wird, wie hierbei die Vergleichung des jetzigen Eindrucks mit früheren Eindrücken ähnlicher Art in das Spiel kommt. Das gegenwärtige Bild ruft in uns wach die Erinnerung an alles, was in früheren Gesichtsbildern Ähnliches sich gefunden hat, und auch an alles, was von sonstigen Erfahrungen mit diesen früheren Gesichtsbildern regelmäßig verbunden war, also z. B. die Anzahl von Schritten, die wir haben machen müssen, um an einen Menschen heranzukommen, dessen Erscheinung im Gesichtsfelde eine gewisse Größe gehabt hatte usw. Diese Art der Assoziation der Vorstellungen geschieht nicht bewußt und nicht willkürlich, sondern wie durch eine blinde Naturgewalt, wenn auch nach den Gesetzen unseres eigenen Geistes, und sie tritt deshalb in unseren Wahrnehmungen ebensogut als eine äußere und zwingende Macht auf, wie die von außen kommenden Eindrücke; und was wir daher vermittels dieser auf die gesammelten Erfahrungen sich stützenden Ideenassoziationen den gegenwärtigen Empfindungen hinzufügen, erscheint ebensogut, wie letztere, uns ohne Willkür und ohne bewußte Tätigkeit von unserer Seite als unmittelbar gegeben, also als unmittelbare Wahrnehmung, während es doch nur zu den Vorstellungen zu rechnen ist.

Besonders interessant sind hierbei solche Fälle, wie die Täuschungen über das Relief von Medaillen, von perspektivischen Zeichnungen und andere ähnliche, wo ein Schwanken zwischen zwei Deutungen möglich ist. Hier finden wir, daß wir beim ersten Anblick in eine dieser Deutungen unwillkürlich verfallen, und zwar der Regel nach wohl in diejenige, welche die größte Anzahl ähnlicher Erinnerungsbilder zurückruft, wie bei den Reliefs von menschlichen Gesichtern, wo wir der Regel nach die der Wirklichkeit entsprechende konvexe Form zu sehen glauben. In anderen Fällen schwankt es unwillkürlich, wie bei Sinstedens Windmühle, wenn durch äußere Zufälligkeiten oder Bewegungen des Auges bald diese, bald jene Ähnlichkeit uns näher tritt. Aber wir können auch absichtlich einen Wechsel der Deutung hervorbringen, wenn wir die Vorstellung der entgegengesetzten Figur möglichst lebhaft in uns aufrufen, bis deren Ähnlichkeit mit dem eben angeschauten Gesichtsbilde sich geltend macht, wo sie dann von selbst und ohne weitere Anstrengung stehen bleibt. Während der Zeit aber, wo sie stehen bleibt, besteht sie mit der vollen Energie sinnlicher Gewißheit, und wenn sich infolge eines wechselnden Umstandes die entgegengesetzte Deutung wieder hervordrängt, hat auch diese wiederum dieselbe Deutlichkeit und Sicherheit, wenn auch das selbstbewußte Denken nun aufmerksam wird, daß es mit einer zweideutigen Anschauung zu tun hat.

Wir gehen jetzt über zur zweiten Klasse der Momente, auf denen sich die Tiefenwahrnehmung stützt, solche nämlich, denen bestimmte sinnliche Empfindungen zugrunde liegen. Unter ihnen ist zuerst zu erörtern, wieviel die **Akkommodation des Auges** leisten kann. Es ist kein Zweifel darüber, daß jemand, der seine Akkommodationsänderungen viel beobachtet hat und das Muskelgefühl der dazu gehörigen Anstrengung kennt, imstande ist anzugeben, ob er bei der Fixierung eines Gegenstandes oder eines optischen Bildes für große oder kleine Sehweiten akkommodiert. Aber die Beurteilung der Entfernung mittels dieses Hilfsmittels ist äußerst unvollkommen. Wundt[1] hat

[1] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig u. Heidelberg 1862. S. 105–118.

darüber Versuche angestellt, indem er den Beobachter mit einem Auge durch eine Öffnung eines feststehenden Schirms nach einem vertikal ausgespannten schwarzen Faden hinblicken ließ. Eine weiße Tafel bildete den Hintergrund. Der Faden konnte längs einer horizontal liegenden Skale verschoben und in gemessene Entfernungen vom Beobachter gestellt werden. Über seine absolute Entfernung konnten dabei so gut wie gar keine Angaben gemacht werden; wohl aber zeigte es sich, daß, wenn dem Faden nacheinander zwei verschiedene Stellungen gegeben wurden, mittels der veränderten Akkommodation erkannt werden konnte, ob sich der Faden entfernt oder genähert habe. Doch wurde dabei eine Annäherung des Fadens, wobei die aktive Muskelanstrengung des Akkommodationsapparats zunehmen muß, deutlicher erkannt, als eine Entfernung desselben. Die bei den Versuchen eintretende Ermüdung des Auges bewirkte eine wachsende Unsicherheit in der Wahrnehmung auch der Annäherungen. WUNDT gibt folgende Resultate seiner Versuche

Entfernung des Fadens vom Auge	Unterscheidungsgrenze für Annäherung	für Entfernung
250 cm	12	12
220	10	12
200	8	12
180	8	12
100	8	11
80	5	7
50	4,5	6,5
40	4,5	4,5

Wenn zwei Fäden in verschiedener Entfernung gleichzeitig aufgespannt wurden, ergaben sich dieselben Resultate wie für die Annäherung eines Fadens.*

Ich habe am Ende einer innen geschwärzten Röhre einen schwarzen Schirm mit zwei senkrechten Spalten angebracht, dann den einen mit einem roten, den anderen mit einem blauen Glase geschlossen. Ich bedurfte einer erheblich stärkeren Akkommodationsanstrengung, um den roten Streifen deutlich zu sehen, als für den blauen. Nach langen Vergleichen beider Streifen entstand auch endlich der Eindruck, als wäre der rote Streifen näher, der blaue ferner, aber die Täuschung trat schwer ein und schwand leicht wieder, sie ließ sich nur durch fortdauernd wechselnde Akkommodation für den einen und den anderen Streifen unterhalten. Die Täuschung ließ sich dadurch unterstützen, daß ich den roten Streifen etwas breiter machte und ihm auch dadurch das Ansehen eines näheren Objektes gab.**

Wichtiger aber und genauer als alle die genannten Hilfsmittel, die Entfernungen zu schätzen, ist die Vergleichung der perspektivischen Bilder, welche derselbe Gegenstand, von verschiedenen Standpunkten aus gesehen, darbietet. Eine solche Vergleichung kann praktisch in doppelter Weise zustande kommen, entweder monokular bei Fortbewegung des Kopfes und Körpers, oder binokular mittels der beiden verschiedenen Bilder, welche beide Augen gleichzeitig von demselben Gegenstande geben. Da die beiden Augen etwas verschiedenen Ort im Raume haben, so sehen sie auch die vor uns liegenden Gegenstände von zwei etwas verschiedenen Gesichtspunkten aus und erzeugen dadurch eine ähn-

* Vgl. hierzu Anm. 2 am Schlusse des Paragraphen. K.

** Über das Entstehen von Tiefeneindrücken durch Farbenunterschiede vgl. Anm. 3 am Schlusse des Paragraphen. K.

liche Verschiedenheit der Bilder, wie sie durch Fortbewegung im Raume nacheinander hervorgebracht wird.

Wenn wir vorwärts gehen, so bleiben die Gegenstände, welche sich am Wege ruhend befinden, hinter uns zurück; sie gleiten in unserem Gesichtsfelde scheinbar an uns vorbei, und zwar in entgegengesetzter Richtung, als wir fortschreiten. Entferntere Gegenstände tun dasselbe, aber langsamer, während sehr entfernte Gegenstände, wie die Sterne, ruhig ihren Platz im Gesichtsfelde behaupten, solange wir die Richtung unseres Körpers und Kopfes beibehalten.* Es ist leicht ersichtlich, daß die scheinbare Geschwindigkeit der Winkelverschiebungen der Gegenstände im Gesichtsfelde hierbei ihrer wahren Entfernung umgekehrt proportional sein muß, so daß aus der Geschwindigkeit der scheinbaren Bewegung sichere Schlüsse auf die wahre Entfernung gemacht werden können.

Die Gegenstände verschiedener Entfernung verschieben sich dabei auch scheinbar gegeneinander. Die entfernteren gehen im Vergleich zu den näheren scheinbar in Richtung des Beobachters vorwärts, die näheren umgekehrt scheinbar zurück. Dadurch entsteht eine sehr deutliche Anschauung ihrer verschiedenen Entfernung. Wenn man z. B. in einem dichten Walde still steht, ist es nur in undeutlicher und gröberer Weise möglich, das Gewirr der Blätter und Zweige, welches man vor sich hat, zu trennen; zu unterscheiden, welche diesem und jenem Baume angehören, in welcher Entfernung die einzelnen hintereinander sich befinden usw. Sowie man aber sich fortbewegt, löst sich alles voneinander, und man bekommt sogleich eine körperliche Raumanschauung von dem Walde, gerade so, als wenn man ein gutes stereoskopisches Bild desselben ansähe.

Auch ist leicht einzusehen, daß sich durch diese scheinbaren Verschiebungen der einzelnen Stämme, Äste und Blätter gegeneinander der wirkliche Wald im unmittelbaren sinnlichen Eindrucke durchaus unterscheiden muß von jedem noch so vollkommenen Gemälde dieses Waldes. Wenn wir an der ebenen Fläche des Gemäldes uns vorüberbewegen, bleibt die scheinbare Lage aller Teile desselben gegeneinander im Gesichtsfelde durchaus die gleiche. Die, welche entfernte Objekte darstellen, verschieben sich gegen den Beobachter durchaus in derselben Weise, als benachbarte Teile, welche nahen Objekten entsprechen. Ein Gemälde kann immer nur den Anblick des Gegenstandes von einem einzigen festen Gesichtspunkte aus gesehen darstellen; wollen wir durch dasselbe eine möglichst vollkommene Täuschung hervorrufen, so muß auch der Beschauer seinen Standpunkt unverändert beibehalten. Jede Bewegung läßt sogleich den Unterschied zwischen dem Urbilde und dem Abbilde in sinnlicher Erscheinung hervortreten.

Nähere Gegenstände bewegen sich schneller, entferntere langsamer. Wenn wir selbst uns ungewöhnlich schnell bewegen, z. B. in Eisenbahnzügen, so erscheinen uns die schnell vorübergleitenden Gegenstände deshalb leicht zu nah, und infolgedessen auch kleiner, als sie sind. Es ist dies eine Gesichtstäuschung, welche von vielen Personen beobachtet und beschrieben wird.[1] Ich selbst habe diese Verkleinerung niemals recht deutlich sehen können, wie es denn viele solcher Täuschungen gibt, welche bei der Gewohnheit größerer Aufmerksamkeit

[1] Dove in Poggendorffs Annalen 1847. LXXI. S. 118.

* Vgl. hierzu Anm. 4 am Schlusse des Paragraphen. K.

auf die Gesichtserscheinungen von selbst schwinden, weil der Beobachter sich in seinem Urteil von den störenden Einflüssen unabhängig zu machen lernt.

Auch bei wissenschaftlichen Beobachtungen kann man die scheinbaren relativen Verschiebungen verschieden entfernter Gegenstände oft benutzen. Soll man z. B. das Fadenkreuz eines Fernrohrs auf das Bild des Objektes genau einstellen, so bewege man das Auge hinter dem Okular ein wenig hin und her, von rechts nach links und zurück. Man wird dann sogleich sehen, ob das Fadenkreuz dabei im Verhältnis zum Bilde still steht oder sich verschiebt. Im ersten Falle fällt es mit dem Bilde zusammen. Im zweiten ist es vor oder hinter ihm; und welches von beiden der Fall sei, ergibt sich ebenfalls sogleich.

Die Bestimmungen der Fixsternparallaxen beruhen bekanntlich auf derselben scheinbaren Verschiebung, wobei nur als Mittel der Fortbewegung des Beobachters die Bewegung der Erde um die Sonne benutzt wird.

Ich glaube auch, daß die Veränderungen des Retinalbildes bei Bewegungen des Körpers es hauptsächlich sind, wodurch einäugige Personen sich richtige Anschauungen von den körperlichen Formen der Umgebungen verschaffen. Wenn jemand, der zwei gesunde Augen besitzt, eines derselben schließt und unregelmäßig gestaltete, unbekannte Gegenstände einäugig betrachtet, so erhält er eine falsche oder mindestens unsichere Vorstellung von ihrer Form. Sowie er sich aber bewegt, gewinnt er sogleich die richtigen Anschauungen.

Auch vergesse man nicht, worauf bisher noch nicht immer der nötige Nachdruck gelegt worden ist, daß in allen physiologisch-optischen Versuchen, wo es sich um Beurteilung der Entfernung eines irgend wie gesehenen Objektes oder Bildes handelt, wohl darauf zu achten ist, daß der Kopf seine Lage gegen das Gesehene nicht ändere, sonst tritt sogleich eine verhältnismäßig gute und genaue Bestimmung der wirklichen Entfernung durch die dabei beobachtete Verschiebung ein.

Bei den bisher besprochenen Änderungen des Retinalbildes durch Bewegung entsteht eine Anschauung von den Entfernungsunterschieden nur dadurch, daß das augenblicklich bestehende Bild verglichen wird mit den in der Erinnerung bewahrten unmittelbar vorhergegangenen Bildern im Auge. Wir haben schon in der Lehre vom Kontrast hervorgehoben, daß eine Vergleichung mittels der Erinnerung viel unsicherer zu sein pflegt, als eine Vergleichung zweier gegenwärtiger sinnlicher Eindrücke. So ist nun auch die Beurteilung der Entfernungen mittels der gleichzeitigen Bilder beider Augen viel vollkommener, sicherer und genauer, als sie durch Bewegungen wenigstens innerhalb so geringer Distanzen, wie die Entfernung der Augen voneinander ist, gewonnen werden kann.

Jedes einzelne Auge zeigt uns ein perspektivisches Bild der vor uns gelegenen Gegenstände. Da aber beide Augen nicht denselben Platz im Raume einnehmen, also die Objekte von etwas verschiedenen Gesichtspunkten aus betrachten, so sind die beiden perspektivischen Bilder, welche sie von ihnen entwerfen, auch etwas voneinander verschieden. Wenn ich ein Blatt Papier so vor mich hinhalte, daß es in die verlängerte Mittelebene meines Kopfes fällt, so sehe ich mit dem rechten Auge die rechte Seite des Papiers, mit dem linken die linke. Das entferntere Ende dieses Papiers erscheint im Bilde meines rechten Auges rechts, in dem des linken links von dem näheren zu liegen. Ähnliche Unterschiede, mehr oder weniger merklich, wird man bei genauerer Aufmerksamkeit viele finden, so oft man mit beiden Augen eine An-

zahl verschieden entfernter Gegenstände betrachtet. Es sind Unterschiede derselben Art und Größe, wie sie entstehen, wenn man das Gesichtsfeld einäugig ansieht, das Auge aber fortbewegt um eine Strecke, welche der Entfernung beider Augen voneinander gleich ist.

Betrachtet man dagegen eine ebene Zeichnung oder ein ebenes Gemälde, so erhalten beide Augen dadurch durchaus dasselbe Netzhautbild (abgesehen etwa von den perspektivischen Verziehungen, die die Ebene des Gemäldes selbst in den beiden Netzhautbildern erleiden kann), während der im Gemälde dargestellte Gegenstand, wenn er nicht selbst eben ist, notwendig in beiden Augen verschiedene Netzhautbilder hervorrufen würde. Dadurch ist also wiederum in der unmittelbaren sinnlichen Anschauung ein Kennzeichen gegeben, wodurch sich der Anblick eines jeden nach drei Dimensionen ausgedehnten Objekts unterscheiden muß von dem Anblick eines ebenen Bildes desselben Objekts.

Auch ist klar, daß, wenn der Ort der beiden Netzhautbilder eines leuchtenden Punktes gegeben ist, daraus für die wissenschaftliche Untersuchung wenigstens, wenn auch noch nicht notwendig für das gemeine Bewußtsein, unzweideutig der Ort des leuchtenden Punktes gefunden werden kann. Man lege durch jedes Netzhautbild und den Knotenpunkt des betreffenden Auges eine gerade Linie, so muß, wie wir früher gezeigt haben, der leuchtende Punkt selbst in jeder dieser beiden Richtungslinien liegen. Also liegt er, wo sich beide schneiden.

Während also durch das einäugige Sehen bei ruhendem Kopfe nur die Richtung, in welcher der gesehene Punkt sich befindet, bestimmt ist, gibt das zweiäugige Sehen hinreichende Beobachtungstatsachen, daß aus ihnen auch die Entfernung des gesehenen Punktes bestimmt werden kann, wenigstens insoweit, als die vorhandenen Data hinreichende Genauigkeit dazu haben und zu dem angegebenen Ende zweckmäßig benutzt werden. Im allgemeinen ist die Genauigkeit in der Bestimmung der Entfernung desto kleiner, je größer diese selbst ist, da weit entfernte Gegenstände in beiden Augen nicht mehr merklich verschiedene Bilder geben.

Daß nun in der Tat auf diesem Wege außerordentlich genaue und deutliche sinnliche Anschauungen der Entfernungen gewonnen werden, läßt sich mittels der **stereoskopischen Bilder** zeigen; es sind dies Bilder, von denen je zwei zusammengehörige die beiden Ansichten darstellen, welche das rechte und das linke Auge desselben Beobachters von dem dargestellten Objekte haben.

Wir haben gesehen, daß ein einzelnes ebenes Bild, mit beiden Augen gesehen, stets einen anderen Eindruck machen muß, als der Gegenstand des Bildes, selbst gesehen, machen würde. Wenn wir nun aber beiden Augen verschiedene Bilder zeigen, einem jeden dasjenige, welches es bei Betrachtung des Gegenstandes selbst wirklich gesehen haben würde, so sind wir imstande, denselben Eindruck auf beiden Netzhäuten hervorzurufen, den der räumlich ausgedehnte Gegenstand wirklich gemacht haben würde, und unter diesen Umständen gewinnen wir durch die beiden Bilder in der Tat dieselbe Anschauung der körperlichen Form, wie bei wirklicher Betrachtung des Gegenstandes selbst.

Zwei Bilder, welche einen stereoskopischen Effekt machen sollen, müssen also zwei verschiedenen perspektivischen Ansichten desselben Gegenstandes entsprechen, welche von verschiedenen Gesichtspunkten aus aufgenommen sind. Sie dürfen einander also nicht gleich sein, vielmehr müssen, verglichen mit den Bildern unendlich entfernter Punkte, die Bilder näherer Punkte in der

Zeichnung für das rechte Auge desto mehr nach links hin, in dem Bilde für das linke Auge desto mehr nach rechts hin liegen, je näher die Objekte dem Beobachter sind. Denkt man sich also die Zeichnungen so aufeinander gelegt, daß die Bilder der unendlich entfernten Gegenstände aufeinander fallen, so werden die Bilder der näheren Objekte desto weiter auseinander fallen, je näher sie sind. Ihre Distanz kann man die stereoskopische Parallaxe nennen. Diese ist positiv, wenn die näheren Punkte für das rechte Auge nach links, für das linke nach rechts abweichen. Die stereoskopische Parallaxe ist gleichgroß für Objekte, welche gleichen Abstand von der Ebene der Zeichnung haben.

Sind keine unendlich entfernten Objekte in der Zeichnung dargestellt, so kann man nur die Unterschiede der stereoskopischen Parallaxe ermitteln in bezug auf irgendwelchen beliebigen Punkt des Objekts. Die Parallaxe in bezug auf solchen Ausgangspunkt ist dann positiv für die näheren, negativ für die entfernteren übrigen Punkte.

Nennen wir den Abstand der Augen $2a$, den Abstand der Zeichnung von den Augen b, den Abstand des Objekts von einer parallel der Zeichnung durch die Augen gelegten Ebene ϱ, und e die stereoskopische Parallaxe, so ist diese

$$e = \frac{2ab}{\varrho},$$

wird also desto kleiner, je entfernter das Objekt und für unendlich entfernte Objekte gleich Null.*

Die zusammengehörigen stereoskopischen Bilder müssen bei einem solchen Versuche so vor die beiden Augen gebracht werden, daß die unendlich entfernten Punkte darin beiden Augen in derselben Richtung erscheinen. Man kann dies ohne Instrument erreichen, wenn man beide Bilder nebeneinander legt, eins rechts, das andere links, so daß zusammengehörige Punkte derselben etwa so weit voneinander entfernt sind, als die Knotenpunkte der beiden Augen des Beobachters. Wenn der Beobachter sich dann mit parallel gerichteten Gesichtslinien vor die Bilder stellt, so sieht er sie beide mit beiden Augen in gleicher Richtung und die stereoskopische Täuschung tritt ein. Freilich sieht er hierbei mit dem rechten Auge nicht bloß das rechte Bild, sondern links daneben auch noch das für das linke Auge bestimmte Bild, und ebenso mit dem linken Auge nicht bloß das letztere Bild, sondern rechts daneben auch noch das andere. Wenn die richtige Stellung der Augen gefunden ist, sieht der Beobachter also nebeneinander scheinbar drei Bilder, von denen die beiden äußeren nur mit je einem Auge gesehen sind (das rechte vom linken, das linke vom rechten Auge) und nicht körperlich erscheinen, das mittlere beiden Augen zugleich angehört und körperlich erscheint.

Bei dem beschriebenen Versuche ist die Anwesenheit der drei Bilder störend; außerdem muß man für die Nähe akkommodieren, während man die Gesichtslinien parallel einstellt, wie es beim Betrachten ferner Gegenstände der Fall ist, und wobei man gewöhnt ist, die Akkommodation für die Ferne einzurichten. Deshalb gehört einige Übung dazu, ehe man in dieser Weise ohne weitere Hilfsmittel stereoskopisch sehen lernt. Übrigens ist die dabei entstehende Gesichtstäuschung ebenso vollkommen, wie bei der Anwendung der

* Über neuere Benennungen der hier in Betracht kommenden Größe vgl. Anm. 5 am Schlusse des Paragraphen. K.

gleich zu beschreibenden Instrumente. Ungeübte erleichtern sich das Gelingen des Versuchs, wenn sie nach den beiden Zeichnungen durch zwei innen geschwärzte Röhren blicken, weil dann die Nebenbilder fortfallen, und wenn sie dabei den beiden Zeichnungen eine geringere Distanz geben, als die der Augen ist. Bei einiger Übung gelingt es auch ohne solche Hilfe; und es ist dies sogar die bequemste Art, große Mengen stereoskopischer Bilder hintereinander durchzusehen. Statt die Gesichtslinien nach einem weit entfernten Punkte einander nahehin parallel zu richten, kann man sie auch nach einem näheren Punkte konvergieren lassen und die stereoskopischen Bilder zur Deckung bringen, indem man das rechte Auge nach dem linken, das linke nach dem rechten Bilde hinwendet, wobei ihre Blicklinien sich also zwischen den Bildern und dem Beobachter schneiden. Die Stellung der Augen ist dabei also so, als wenn man diesen Schnittpunkt fixierte, und dort, also den Augen näher, als die Bilder wirklich sind, erscheint auch der stereoskopisch gesehene Gegenstand. Bei diesem Versuche muß man aber natürlich auch das für das rechte Auge bestimmte Bild nach links legen, das für das linke nach rechts, sonst wird die stereoskopische Parallaxe negativ, und man bekommt verkehrtes Relief, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man zwei nebeneinander liegende Linienzeichnungen ohne Schattierung, z. B. von Kristallmodellen bald mit ungekreuzten, bald mit gekreuzten Blicklinien kombiniert.

Die Instrumente, welche unter dem Namen der Stereoskope zur Betrachtung der stereoskopischen Bilder gebraucht werden, haben nur zum Zweck, dem Beobachter die Auffindung und Erhaltung der richtigen Augenstellung zu erleichtern und die störenden Nebenumstände wegzuschaffen; für die Erzeugung der Gesichtstäuschung sind sie ohne wesentlichen Vorteil.

Das erste war das Stereoskop von Wheatstone, im Durchschnitte dargestellt in Fig. 50. Der wesentliche Teil des Instruments sind zwei Spiegel ab und $\alpha\beta$, welche unter 45^0 gegen den Horizont geneigt sind, und deren nach oben gekehrte Flächen spiegeln; cd und $\gamma\delta$ sind Brettchen, an denen die Zeichnungen angebracht werden. Der Beobachter, dessen Augen durch r und ϱ angedeutet sind, blickt von oben her in die Spiegel. Das Licht, was von cd kommt, wird vom Spiegel ab gegen das Auge r so reflektiert, als käme es von dem Spiegelbilde ff.

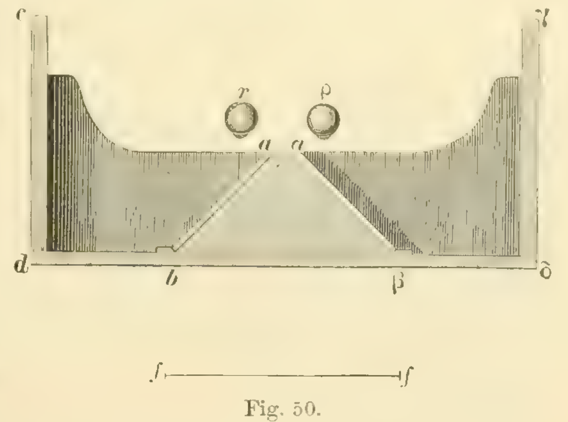


Fig. 50.

Aber auch das von $\gamma\delta$ kommende Licht wird durch den Spiegel $\alpha\beta$ nach dem Auge ϱ so reflektiert, als käme es vom Bilde ff. So glauben also beide Augen das betreffende Bild bei ff zu sehen, und wenn nun die beiden Bilder Unterschiede zeigen, wie sie ein bei f befindlicher Gegenstand zeigen würde, so entsteht derselbe sinnliche Eindruck, als sähe der Beobachter bei ff nicht die Bilder, sondern den räumlich ausgedehnten Gegenstand. Da die Zeichnungen hierbei durch Spiegel gesehen werden, welche rechts in links verkehren, so müssen sie negative stereoskopische Parallaxe haben.

Das Stereoskop von BREWSTER, welches gegenwärtig am meisten verbreitet ist, enthält zwei Prismen p und π mit konvexen Flächen, Stücke aus einer dicken Konvexlinse von 0,18 m Brennweite, die optisch wirken wie die Kombination eines ebenen Prisma mit einer Konvexlinse. Die beiden Zeichnungen ab und $\alpha\beta$, Fig. 51, befinden sich nebeneinander auf demselben Blatte. Das rechte Auge r blickt durch das Prisma p nach der Zeichnung ab, das linke Auge ϱ durch das Prisma π nach der Zeichnung $\alpha\beta$; die Scheidewand g hindert, daß jedes Auge die für das andere bestimmte Zeichnung sehen kann. Die von den Zeichnungen ausgehenden Strahlen cp und $\gamma\pi$ werden durch die Prismen in die Richtungen pr und $\pi\varrho$, welche sich verlängert in q schneiden, gebrochen. Durch die konvexen Flächen der Prismen werden die Strahlenbündel zugleich weniger divergent gemacht, so daß beide Augen ein Bild der zugehörigen Zeichnung in fq sehen. Das Objekt erscheint körperlich in der Lage $f\varphi$. Das Ganze ist in einen passenden Holzkasten eingeschlossen; um transparente Bilder betrachten zu können, befindet sich hinter den Zeichnungen $ab\,\alpha\beta$ eine mattgeschliffene Glasplatte. Die Bilder werden durch passende Spalte an den Seiten des Kastens bei a und β ein- und ausgeschoben.

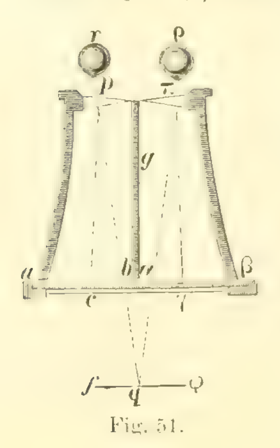


Fig. 51.

Das Stereoskop von BREWSTER ist viel kompendiöser, als das von WHEATSTONE, man kann leichter eine gleichmäßige Beleuchtung beider Bilder bewirken und die Zeichnungen erscheinen vergrößert; doch ist zu bemerken, daß an den Grenzen von Hell und Dunkel schmale farbige Ränder auftreten, wenn die Prismen nicht achromatisch gemacht werden, was übrigens in manchen dieser Instrumente geschehen ist. Andere Formen von Stereoskopen werden weiter unten beschrieben werden.

Am schlagendsten treten die Wirkungen des Stereoskops hervor an Zeichnungen, welche nur Umrisse von Körpern und Flächen darstellen, wo alle weiteren Hilfsmittel der Täuschung, Farbe, Schatten usw. fortfallen, und doch die schwarzen Linien von der Fläche des Papiers vollkommen losgelöst und durch den Raum hin gezogen erscheinen. Selbst die verwickeltsten stereometrischen Zeichnungen, Darstellungen von Kristallmodellen, die ohne Stereoskop gesehen kaum verständlich sind, lösen sich vollständig auf und erscheinen als räumliche Gebilde.

Während bei solchen Linienfiguren der Unterschied zwischen dem stereoskopischen und nicht stereoskopischen Anblicke am auffallendsten ist, ist die Lebhaftigkeit der Täuschung selbst natürlich am größten, wenn auch durch eine naturgetreue Schattierung die Körperform herausgehoben ist. Doch ist es fast unmöglich, mit dem Bleistift oder dem Pinsel in der Schattierung von Zeichnungen die feinen Unterschiede beider Bilder genau wiederzugeben, welche dem Bilde des rechten und linken Auges entsprechen, und nur mit Hilfe der Photographie gelingt es, die genaue Übereinstimmung beider Bilder zu erreichen, welche für einen guten stereoskopischen Eindruck nötig ist. Da dergleichen stereoskopische Photographien jetzt überall im Handel zu haben sind, so darf ich voraussetzen, daß sie meinen Lesern allgemein bekannt sind. Sie werden angefertigt, indem man denselben Gegenstand zweimal photographisch abbildet, und zwar von zwei etwas verschiedenen Standpunkten aus. Entweder tut man

es gleichzeitig mit zwei photographischen Apparaten oder schnell nacheinander mit demselben Apparate. Die Anwendung von zwei Apparaten ist namentlich bei schnell veränderlichen Gegenständen nötig. Schon wenn die Objekte von der Sonne direkt beleuchtet sind, verschieben sich die Schlagschatten oft merklich zwischen der Aufnahme des ersten und zweiten Bildes, da doch gewöhnlich 5 bis 10 Minuten vergehen, ehe der Apparat für die zweite Aufnahme eingestellt ist. Noch notwendiger ist die Anwendung zweier photographischer dunkler Kammern, wenn sogenannte instantane Bilder von beweglichen Gegenständen, Wellen, Schiffen, Pferden usw. gemacht werden sollen, bei denen unter Benützung scharfer Sonnenbeleuchtung und sehr empfindlicher photographischer Präparate die Expositionszeit auf einen Bruchteil einer Sekunde beschränkt werden kann.

Die Naturwahrheit solcher stereoskopischer Photographien und die Lebhaftigkeit, mit der sie die Körperform darstellen, ist nun in der Tat so groß, daß manche Objekte, z. B. Gebäude, die man aus stereoskopischen Bildern kennt, wenn man später in Wirklichkeit vor sie hintritt, nicht mehr den Eindruck eines unbekannten oder nur halb bekannten Gegenstandes machen. Man gewinnt in solchen Fällen durch den wirklichen Anblick des abgebildeten Gegenstandes, wenigstens für die Formverhältnisse, keine neuen und genaueren Anschauungen mehr, als man schon hat. Wie viel durch das stereoskopische Sehen gewonnen wird, ist auch hierbei natürlich am auffallendsten an den Bildern solcher Gegenstände, welche sich schlecht zur Darstellung in einer einfachen Zeichnung oder Gemälde eignen, wie z. B. an Bildern von unregelmäßigen Felsen, Eisblöcken, mikroskopischen Objekten, Tieren, Wäldern usw. Namentlich die Abbildungen von Gletschereis mit seinen tiefen Spalten, welche durch die Masse des Eises hindurch erleuchtet sind, machen eine überraschende Wirkung. Das einzelne Bild, einzeln betrachtet, macht in solchem Falle gewöhnlich nur den Eindruck eines unverständlichen Aggregats grauer Flecke, während in der stereoskopischen Kombination die Formen der Eisblöcke, sowie das transparente und reflektierte Licht derselben auf das deutlichste hervortreten. Es wird in diesem Falle das Verständnis des einzelnen Bildes so schwer, weil einmal schon so unregelmäßige Formen, wie die der Eisblöcke, auch bei bloßer Beleuchtung durch auffallendes Licht nicht deutlich wiederzugeben sind, vollends aber bei der transparenten Beleuchtung auch die gewöhnlichen Gesetze der Schattierung ganz abgeändert werden.

Sehr überraschend ist auch die stereoskopische Darstellung glänzender Gegenstände, z. B. einer von leichten Wellen bewegten Wasserfläche; doch können wir die stereoskopische Darstellung des Glanzes erst im folgenden Paragraphen besprechen.

Wir gehen nun über zur Untersuchung der Genauigkeit, mit welcher sich die Tiefendimensionen des Gesichtsfeldes mittels der gleichzeitigen Tätigkeit beider Augen beurteilen lassen. Dabei haben wir zu unterscheiden die Beurteilung der absoluten Entfernung der gesehenen Objekte, und die Beurteilung der Entfernungsunterschiede verschiedener Objektpunkte. Die erstere kann bei Ausschluß der früher besprochenen Momente nur gestützt werden auf die Empfindung des absoluten Grades der Konvergenz, in welchem sich die beiden Blicklinien befinden, wenn sie auf einen gewissen Objektpunkt gerichtet sind; die Unterschiede der beiden Netzhautbilder können dazu nichts beitragen, oder wenigstens sind, wie es scheint, diejenigen Unterschiede der

Bilder, welche etwa dazu beitragen könnten, zu unbedeutend, als daß daraus ein wirklicher Nutzen gezogen würde. — Die Beurteilung der Entfernungsunterschiede verschiedener Objektpunkte beruht auf dem Unterschiede der Bilder in beiden Sehfeldern. Sie könnte beruhen einmal auf einer Perception des Unterschiedes der beiden Netzhautbilder bei ruhenden Blicklinien, oder auf einer Perception der Bewegungsunterschiede, welche eintreten, wenn die Augen von der Fixation eines Objektpunkts zu der eines anderen übergeführt werden. Bei den bisherigen Versuchen hat sich noch kein Unterschied in der Schärfe der Wahrnehmung herausgestellt, der von der Vermeidung oder Ausführung von Augenbewegungen abhinge, und die Vergleichung der Netzhautbilder scheint daher mit so überwiegender Feinheit vollzogen zu werden, daß die Bewegungsunterschiede daneben nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Wir werden später indessen sehen, daß namentlich bei schwer zu kombinierenden Bildern die Evidenz der Täuschung durch die Bewegungen des Auges wesentlich unterstützt wird.

Wir beginnen mit der Beurteilung der Entfernungsunterschiede, soweit dieselbe von der Vergleichung verschiedener Netzhautbilder abhängt, wobei aber wohl zu verstehen ist, daß hier die Differenzen der Bilder in beiden Sehfeldern als solche noch nicht zum Bewußtsein kommen, sondern nur die Unterschiede der Tiefendimension, die von jenen Unterschieden abhängen, aufgefaßt und geschätzt werden.

Die Vergleichung der beiden Netzhautbilder, wie sie sich in der Wahrnehmung der Tiefendimension zu erkennen gibt, ist außerordentlich genau, und es werden darin zuweilen Unterschiede wahrgenommen, welche kaum in anderer Weise ohne künstliche Meßinstrumente wahrgenommen werden können. Schon bei den gewöhnlichen stereoskopischen Photographien sind die Unterschiede beider Bilder meistens so klein, daß eine außerordentlich genaue Untersuchung dazu gehört dieselben zu entdecken, und gewöhnlich bemerkt man Unterschiede nur längs der Konturlinien vorderer Gegenstände, welche die dahinter liegenden bald im rechten, bald im linken Bilde etwas mehr verdecken.

Dove[1] hat schon folgende Beispiele von der Genauigkeit des stereoskopischen Sehens gegeben:

Wenn man zwei Medaillen, die mit demselben Stempel geschlagen sind, aber aus verschiedenen Metallen, stereoskopisch kombiniert, so sieht das Gesamtbild schräg liegend und gewölbt aus, nicht eben. Der Grund davon beruht darin, daß die Metalle durch den Druck des Stempels beim Prägen komprimiert werden und sich nachher ihrer verschiedenen Elastizität entsprechend wieder verschieden stark ausdehnen. Deshalb sind Medaillen aus verschiedenen Metallen geprägt nicht genau gleich groß, aber ihre Größenunterschiede sind außerordentlich klein. Ich selbst habe bei Professor Dove solche Medaillen gesehen, eine aus Silber, eine aus Bronze bestehend, deren Größenunterschied mit bloßem Auge gar nicht zu entdecken war, selbst wenn man sie aufeinander legte, und die doch ein deutlich gewölbtes Bild gaben.

Wenn in einer Buchdruckerpresse derselbe Satz von Buchstaben zweimal gesetzt wird, so ist es, wenigstens ohne ungewöhnliche Vorsichtsmaßregeln, nicht möglich, die Abstände der Buchstaben genau gleich zu machen. Infolgedessen erscheinen im Stereoskop bei der Kombination zweier solcher Drucke

[1] Optische Studien von W. H. Dove. Berlin 1859. S. 26—36.

einzelne Worte und Buchstaben vor oder hinter den anderen liegend. Ganz eben erscheint ein solcher Druck nur, wenn beide Exemplare mit demselben Buchstabensatze gedruckt sind; und auch dann kann das Ganze noch gewölbt und schräg liegend erscheinen, wenn durch verschiedene Befeuchtung oder Zerrung das Papierblatt im ganzen sich gedehnt hat; doch erscheinen dann keine unregelmäßigen Erhöhungen einzelner Buchstaben.

Wie man auf diese Weise die zweite Auflage eines Druckes von der ersten unterscheiden kann, so kann man auch nachgemachte Geldpapiere von echten unterscheiden, weil es nicht möglich ist in der Kopie den Abstand der Buchstaben so genau gleich denen des Originals zu machen, daß nicht Erhebungen und Vertiefungen einzelner unter ihnen zum Vorschein kämen, wenn man ein echtes und ein unechtes Papier im Stereoskope kombiniert. Auch an zwei echten Exemplaren desselben Wertpapieres zeigen sich übrigens solche Teile, welche mit verschiedenen Druckplatten gedruckt sind, gewöhnlich in verschiedener Ebene, und man kann mittels des Stereoskops leicht ermitteln, wieviel Platten zum Drucke des Papiers angewendet sind. Sehr bequem ist dieselbe Methode auch, um an Maßstäben zu kontrollieren, ob die Teilstriche alle gleich groß sind. Man braucht nur zwei verschiedene Teile desselben Maßstabs stereoskopisch zum Decken zu bringen. Sind die Teile gleich groß, so erscheinen alle Teilstriche in einer Ebene zu liegen. Sind die Teile unregelmäßig, so treten einige Striche vor, andere zurück.

Ein anderes Beispiel solcher kleinen Verschiebungen, welche durch stereoskopische Kombinationen leicht sichtbar werden, und welches mir gelegentlich auffiel, ist folgendes. Wenn man mit einem Auge frei, mit dem anderen aber durch den warmen Luftstrom über dem Schornstein einer brennenden Lampe nach der Tapete des Zimmers blickt, so sieht man bei einiger Aufmerksamkeit eine große einspringende und eine ausspringende Falte in der Tapete, als hätte sich diese von der Mauer losgelöst. Sieht das rechte Auge durch den warmen Luftstrom, so erscheint rechts die vorspringende, links die zurückspringende Falte; umgekehrt dem linken Auge. Am deutlichsten wird das Phänomen, wenn sich der Beobachter etwa drei Fuß von der Wand aufstellt, und die Lampe in die Mitte dieser Entfernung. Dann fallen die beiden ausspringenden Falten für beide Augen an denselben Ort zusammen und die Wirkung verstärkt sich somit. Die Erscheinung erklärt sich durch die Brechung des Lichts in dem warmen Luftstrom. Sei dessen Querschnitt durch den Kreis A in Fig. 52 angedeutet, r und ϱ seien die beiden Augen des Beobachters, a, b, c Punkte der Wand, so erscheinen diese dem Auge r in Richtung der drei geradlinigen Richtungsstrahlen ra, rb und rc. In das Auge ϱ gelangen die Strahlen aber auf den Wegen $a a_1 \varrho$, $b \varrho$ und $c c' \varrho$, wegen der Brechung in dem warmen Luftstrome A. Nur der durch dessen Mitte gehende Strahl $b\varrho$ kann geradlinig bleiben. Dem Auge ϱ erscheinen die Punkte c und a also in Richtung der Verlängerung der Strahlen $\varrho c'$ und $\varrho a'$, beiden Augen zusammen also in γ und α, wo sich beziehlich $\varrho c'$

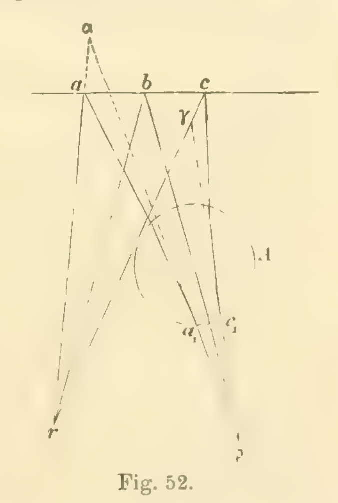


Fig. 52.

mit re und $\varrho a'$ mit ra schneidet. So erscheint also die Tapete hervorgetrieben auf der Seite des Auges, welches durch den warmen Luftstrom sieht, auf der andern Seite zurücktretend.

Ich habe noch einige Versuche angestellt über den Grad von Genauigkeit, der in der stereoskopischen Vergleichung der beiden Netzhautbilder erreicht werden kann. Zu dem Ende habe ich drei gleiche Nadeln senkrecht befestigt an dem Ende dreier vierkantiger kleiner Holzbalken, diese nebeneinander auf einen ebenen Tisch gelegt, so daß sich die drei Nadeln nebeneinander in Abständen von je 12 mm und nahehin in derselben Ebene befanden. Ich stellte mich dann so auf, daß meine Augen sich in oder etwas unter der verlängerten oberen Ebene der drei Bälkchen befanden, und ich also die drei Nadeln sah, ohne die Begrenzungslinie desjenigen Endes der Holzbalken sehen zu können, an welchem die Nadeln befestigt waren. Die Entfernung meiner Augen von den Nadeln betrug 340 mm. Unter diesen Umständen konnte ich nur mittels der Vergleichung der beiden Netzhautbilder erkennen, ob die Nadeln genau in einer vertikalen Ebene sich befanden oder nicht. Waren sie es nicht, so konnten sie durch Verschiebung eines der Hölzer, in denen sie befestigt waren, in eine Ebene gebracht werden, so gut es der Beobachter eben erkennen konnte, und wenn man nachher das eine Auge in Richtung dieser Ebene brachte und nach den Nadeln hinblickte, konnte man leicht erkennen, inwieweit die Einstellung der Nadeln gelungen war. Es ist dabei zu bemerken, daß man die Abstände der Nadeln voneinander nicht zu groß machen darf, weil sich dann eine eigentümliche Täuschung des Urteils einmischt, die im folgenden Abschnitt bei der Lehre vom Horopter besprochen werden soll. Für den Zweck sind die oben angegebenen Distanzen passend und machen jene Täuschung ohne Einfluß. Ich habe mich unter diesen Umständen nie, auch nur um eine halbe Dicke der Nadeln, d. h. um $^1/_4$ mm geirrt, wenn die Ebene der Nadeln senkrecht zur Gesichtslinie war. War dieselbe stark gegen die Gesichtslinie geneigt, so war die Vergleichung nicht ganz so sicher. Wenn eine Nadel um ihre eigene Dicke, also um $^1/_2$ mm, vor oder hinter die Ebene der anderen getreten war, war dies mit vollkommener Sicherheit zu erkennen. Man kann unter diesen Umständen leicht berechnen, um wie viel das Bild der mittleren Nadel verglichen mit denen der beiden äußeren in dem einen Auge anders lag, als in dem anderen, wenn dieselbe $^1/_2$ mm vor der Ebene der beiden anderen sich befand. Die Distanz meiner Augen beträgt 68 mm. Auf die Ebene der beiden anderen Nadeln projiziert, würde die Lage der mittleren Nadel in den beiden Netzhautbildern $\frac{1}{2} \cdot \frac{68}{340} = \frac{1}{10}$ mm verschieden gewesen sein. Eine Breite von $\frac{1}{10}$ mm auf 340 mm Distanz liegt schon an der Grenze der kleinsten sichtbaren Abstände. Sie entspricht einem Winkel von $60^1/_2$ Winkelsekunden, oder 0,0044 mm Distanz auf der Netzhaut. Daraus folgt also, daß die Vergleichung der Netzhautbilder beider Augen zum Zweck des stereoskopischen Sehens mit derselben Genauigkeit geschieht, mit welcher die kleinsten Abstände von einem und demselben Auge gesehen werden.*

Sehr kleine Unterschiede, herrührend von der verschiedenen Brechbarkeit verschiedenfarbiger Lichtstrahlen, kommen auch zur Wirkung nach einer Bemerkung von Brewster, wenn man durch eine Konvexlinse von 2—3 Zoll

* Vgl. über diesen Punkt Anm. 6 am Schlusse des Paragraphen. K.

Breite nach einem roten und einem blauen Objekte hinsieht, die in gleicher Entfernung vom Beobachter sich befinden. Dann erscheint das rote näher als das blaue.

Die stereoskopische Unterscheidbarkeit der Tiefendistanzen nimmt für entferntere Gegenstände schnell ab. Das mathematische Gesetz dafür hat eine ähnliche Form, wie das für die Bilder von Konvexlinsen. Es sei r die Distanz des entfernteren Punktes vom Auge, ϱ die des näheren, und f eine Konstante, von der die Genauigkeit abhängt, so ist die Tiefendistanz der Punkte unterscheidbar, wenn

$$\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r} > \frac{1}{f}.$$

Nach den eben angeführten Messungen können wir den Wert von f gleich oder größer als 240 m setzen. Setzen wir statt r den Abstand des Objekts, statt ϱ den Abstand des Bildes von einer konvexen Linse, deren negative Brennweite gleich f ist, so wird

$$\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r} = \frac{1}{f}.$$

Wenn man also irgendeinen Gegenstand durch eine äußerst schwache Konkavlinse von 240 m negativer Brennweite ansehen würde, so würde das Bild des Gegenstandes an der Stelle des entferntesten Objekts liegen, welches stereoskopisch noch, als vor jenem ersten liegend, erkannt werden könnte. Wer daran gewöhnt ist, die Lage der Linsenbilder zu übersehen, wird hierdurch gleich erkennen, daß in der Entfernung nur sehr große Tiefendimensionen, in der Nähe dagegen sehr kleine erkannt werden können.

Die Größe f in dieser Formel bezeichnet die weiteste Distanz, in welcher ein Objekt stereoskopisch noch von unendlich weit dahinter gelegenen Gegenständen unterschieden werden kann.

Über die Energie, mit welcher die stereoskopische Vergleichung der Netzhautbilder die Vorstellung verschiedener Entfernung gibt, im Vergleich mit den übrigen Hilfsmitteln des Sehens, ist namentlich eine Abänderung des Stereoskops, das Pseudoskop, lehrreich. Dieses Instrument ist dazu bestimmt, die binokularen Bilder wirklicher Gegenstände so zu verändern, daß man falsche stereoskopische Reliefs davon erhält. Das Pseudoskop von WHEATSTONE enthält zwei rechtwinkelige Glasprismen, deren Kanten rechtwinkelig zur Visierebene gestellt sind, und durch welche der Beobachter in einer ihrer Hypotenusenfläche parallelen Richtung hindurchblickt. Es ist oben auf S. 52 und in Fig. 6 Bd. III schon der Gang der Strahlen in einem solchen Prisma angegeben worden. Man sieht durch ein solches Prisma Objekte, die in Richtung des ihrer Hypotenusenfläche parallelen unabgelenkten Strahls liegen, an ihrem richtigen Orte, die rechts daneben befindlichen dagegen durch die Spiegelung nach links, die links befindlichen nach rechts verlegt. Da jedes Auge die Objekte in dieser Weise durch die Spiegelung symmetrisch umgelagert erblickt, so sind die Bilder beider Augen wieder miteinander in Übereinstimmung. Die beiden Prismen werden übrigens in kurze Röhren eingesetzt, so daß ihre Hypotenusenfläche der Achse der Röhre parallel ist. Die Röhren müssen um ihre eigene Achse und um eine zur Visierebene senkrechte Achse drehbar sein, damit man die beiden Bilder in übereinstimmende Stellung bringen kann.

Daß dabei auch das stereoskopische Relief verkehrt werden muß, läßt sich leicht an einem einfachen Beispiele erkennen. Man denke sich als Objekt symmetrisch zu der Mittelebene des Kopfes gelegen einen viereckigen Balken. Beide Augen werden von diesem die vordere Fläche sehen, das rechte auch noch etwas von der rechten Seitenfläche, das linke etwas von der linken. Wenn man nun aber durch das Pseudoskop sieht, erscheint dem rechten Auge das, was es von der rechten Seitenfläche sieht, links neben der vorderen Fläche zu liegen. Das linke Auge sieht umgekehrt etwas von einer Seitenfläche rechts von dieser. Das kann nun an einem Balken nicht vorkommen, wohl aber an einer hohlen Rinne von viereckigem Querschnitt, welche an der dem Beobachter zugekehrten Seite geöffnet ist. In einer solchen würde das rechte Auge in der Tat ein verkürztes Bild der linken Seitenfläche sehen, das linke Auge eines der rechten. Dementsprechend erscheint nun auch der Balken durch das Pseudoskop in der Tat als eine hohle Rinne. Ebenso erscheinen überhaupt konvexe Körper als konkav, nähere Gegenstände entfernter und so fort.

Die pseudoskopische Täuschung gelingt übrigens doch nur an einer kleinen Zahl von Gegenständen, weil ihr teils die Kenntnis der gewöhnlichen Formen, teils die Schlagschatten hindernd in den Weg treten. Ich habe schon früher hervorgehoben, daß die Schlagschatten immer unzweideutige Auskunft über gewisse geometrische Verhältnisse geben. Der schattengebende Körper muß immer vor der beschatteten Fläche liegen. Wenn nun auf einer ebenen Fläche irgend ein hervorspringender Körper liegt, so wirft er seinen Schatten auf die Unterlage. Im Pseudoskop sollte er nun eigentlich hinter der Fläche liegend erscheinen, als wäre er in diese eingegraben. Dann hat aber der Schlagschatten keinen Sinn und stört die Möglichkeit der Täuschung. Ebenso hinderlich ist es, wenn eine vorliegende Fläche eine hinterliegende teilweise verdeckt. Dann sieht das rechte Auge an der rechten Seite der vorliegenden Fläche etwas mehr von der hinterliegenden als das linke, und das hat ebenfalls bei der pseudoskopischen Umkehrung keinen Sinn.

Die Körper, welche man pseudoskopisch sehen will, muß man deshalb im allgemeinen frei im Raume aufstellen, vor einer entfernteren gleichmäßig gefärbten Wand als Hintergrund, auf die sie keinen deutlichen Schlagschatten mehr werfen können, und die keine auffallenden Merkzeichen hat, die sich selbst als Gesichtsobjekt darböten. Ferner muß man vermeiden, daß ein Teil des Objekts perspektivisch einen anderen Teil teilweise deckt. Passende Objekte sind z. B. Zylinder von beschriebenem oder gedrucktem Papier, von Holz usw., welche wie hohle Rinden aussehen, Zigarren, welche wie ein hohles Tabaksblatt aussehen, Medaillen, von vorn beleuchtet, welche wie Siegel vertieft erscheinen. Sehr lebhaft finde ich die Täuschung bei der pseudoskopischen Betrachtung eines hohlen Glaszylinders, der eine eingeätzte Teilung zur Abmessung von Flüssigkeiten trägt. Ist die Teilung dem Beschauer zugekehrt, so erscheint sie durch das Pseudoskop an der abgewendeten Seite des Zylinders. Auch vertikale Drähte oder Fäden, die sich in verschiedener Entfernung vom Beobachter befinden, geben ein sehr geeignetes Objekt. Die näheren erscheinen durch das Pseudoskop entfernter, die entfernteren nahe.

Wo die Bekanntschaft mit der wirklichen Form der Objekte oder der Schlagschatten hindernd entgegentritt, gelingt es oft noch durch eine lebhafte Vorstellung der pseudoskopischen Form, wie sie erscheinen sollte, die Vorstellung derselben hervorzurufen; und wenn sie sich einmal gebildet, bleibt sie

auch ohne Mühe bestehen. Andererseits kann man auch wohl wieder die Anschauung der wirklichen Form zurückrufen, doch fühlt man sich bei dieser durch die dazu nicht stimmenden Differenzen der beiden Netzhautbilder immer einigermaßen beunruhigt und gestört.

Während das Pseudoskop das Relief der gesehenen Gegenstände umkehrt, wird es von dem Telestereoskop stärker hervorgehoben, als es in der natürlichen Anschauung geschieht, und das letztere Instrument ist deshalb besonders brauchbar, um an sehr entfernten Gegenständen, die im natürlichen Sehen keine oder nur eine sehr undeutliche stereoskopische Anschauung geben, das Relief deutlicher hervorzuheben. Für die Betrachtung sehr weit entfernter Gegenstände sind die menschlichen Augen nicht weit genug voneinander entfernt, um zwei merklich verschiedene Bilder derselben zu geben, man muß also die Distanz der Gesichtspunkte künstlich vergrößern, um zwei hinreichend ver-

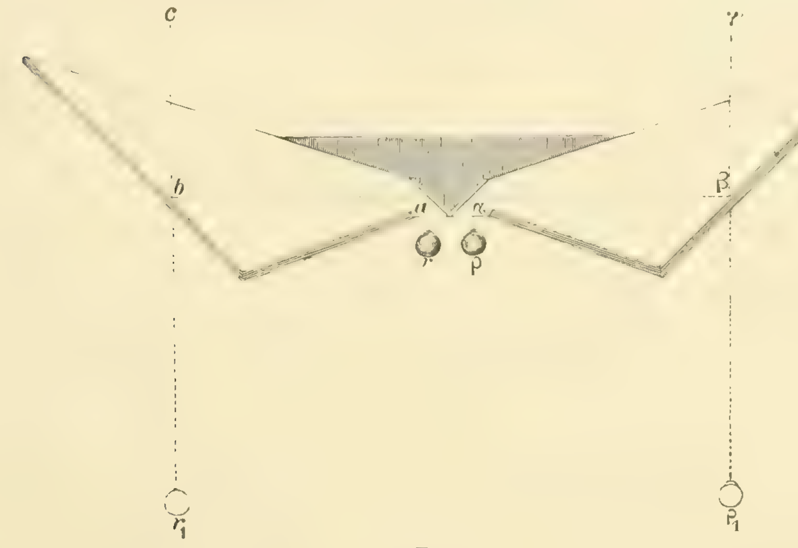


Fig. 53.

schiedene Bilder zu erhalten. Dies geschieht im Telestereoskop mit Hilfe von vier Planspiegeln, welche in Fig. 53 bei a, b, α und β im Durchschnitt dargestellt sind. Die beiden Augen des Beobachters befinden sich bei r und ϱ. Die Linien $c\,b\,a\,r$ und $\gamma\,\beta\,\alpha\,\varrho$ bezeichnen den Gang der Lichtstrahlen. Die vier Spiegel sind in einem Kasten, dessen Wände im Durchschnitt dargestellt sind, so befestigt, daß sie kleine Drehungen erlauben, um die Bilder zur Koinzidenz zu bringen. Es genügt, wenn die Spiegel a und α rechtwinkelig zueinander und zur Basis des Kastens befestigt sind, daß der Spiegel β mittels einer Stellschraube um eine horizontale, und der Spiegel b durch eine andere Schraube um eine vertikale Achse gedreht werden kann. Um ein großes Gesichtsfeld zu haben, muß man die äußeren Spiegel möglichst groß machen.

Wenn r_1 den Ort des Spiegelbildes bezeichnet, welches das System der beiden Spiegel a und b vom Auge r entwirft, und ebenso ϱ_1 das Spiegelbild von ϱ, entworfen durch die Spiegel α und β, so sieht das Auge r mittels der beiden Spiegel die vorliegende Landschaft so, wie sie einem in r_1 befindlichen Auge ohne die Spiegel erscheinen würde; und das Auge ϱ sieht die Landschaft,

wie sie von ϱ_1 aus erscheint. Da nun die Punkte r_1 und ϱ_1 viel weiter auseinanderliegen als die wirklichen Augen r und ϱ, so sind auch die Differenzen der beiden Bilder der Landschaft, wie sie von r_1 und ϱ_1 aus gesehen erscheinen würde, viel größer, als die natürlichen Differenzen in beiden Augen, und demgemäß erscheint nun auch das stereoskopische Relief der entfernten Objekte, namentlich entfernter Bergzüge und Terrainformen, viel deutlicher als dem bloßen Auge. Wenn die Spiegel so gestellt sind, daß unendlich entfernte Objekte durch das Telestereoskop mit parallelen Gesichtslinien gesehen werden, so erhält die Landschaft dadurch das Ansehen, als wenn der Beobachter nicht die natürliche Landschaft, sondern ein sehr zierliches und genaues Modell derselben vor sich hätte, welches im Verhältnis der Distanzen $r_1 \varrho_1 : r \varrho$ (Fig. 53) verkleinert ist.

Etwas ähnliches wie das Telestereoskop leisten auch die meisten stereoskopischen Photographien von Landschaften, weil in der Regel der Abstand der beiden Gesichtspunkte auch bei der photographischen Aufnahme viel größer gewählt wird, als die natürliche Distanz der Augen. Andererseits können mittels der Photographie stereoskopische Bilder selbst von Himmelskörpern, namentlich schön vom Monde, erhalten werden, wenn man zwei zu verschiedenen Zeiten aufgenommene Bilder kombiniert, wobei die betreffenden Gestirne der Erde etwas verschiedene Seiten zugewendet haben. Obgleich der Mond der Erde im ganzen fortdauernd dieselbe Seite zukehrt, so kommen doch kleine Schwankungen in seiner Stellung vor, welche es möglich machen, von ihm stereoskopische Bilder zu erhalten, wenn man ihn in zwei verschiedenen Monaten photographiert, in solchen Augenblicken, wo die Beleuchtung desselben durch die Sonne genau dieselbe war. Solche Photographien geben nicht bloß die Kugelgestalt unseres Trabanten deutlich wieder, sondern auch einzelnes von dem Relief seiner Ringgebirge.

Die Beurteilung der **absoluten Entfernung** eines zweiäugig gesehenen Objekts würde, wenn alle anderen Mittel der Schätzung fehlen, vollzogen werden können mittels des Gefühls für den Grad der Konvergenz, in die unsere auf das Objekt gerichteten Blicklinien sich stellen. Doch ist dieses Gefühl ziemlich unsicher und ungenau, und wir sind in dieser Beziehung unter Umständen ziemlich bedeutenden Täuschungen ausgesetzt.

Um zunächst zu erweisen, daß wir in der Tat die absolute Entfernung der gesehenen Objekte und demgemäß auch ihre Größe nach der Konvergenz der Blicklinien beurteilen, solange nicht andere hindernde Umstände dazwischentreten, dient der von Wheatstone angegebene Versuch. Dieser hatte sich sein Spiegelstereoskop so einrichten lassen, daß erstens die beiden Bilder den Spiegeln genähert und von ihnen entfernt werden konnten. Die parallelen Wände, an welchen die Bilder aufgestellt sind, sind auf Schlitten verschiebbar, die beiden Arme des Stereoskops aber drehbar um eine feste Achse, welche zwischen den Spiegeln liegt. Je näher die beiden Bilder den Spiegeln gebracht werden, desto größer werden die beiden Retinabilder ohne Veränderung der Konvergenz. Dabei nimmt die scheinbare Größe des gesehenen Objekts zu, ohne Veränderung seiner scheinbaren Entfernung. Läßt man dagegen die Bilder an den Armen des Instruments unverrückt, dreht aber die Spiegel um ihre mittlere Achse, so ändert sich die Konvergenz, während die Größe des Netzhautbildes unverändert bleibt. Dabei vermindern sich scheinbare Größe und Entfernung des gesehenen Objekts, wenn die Konvergenz zunimmt.

Ähnliche Verkleinerung und Vergrößerung der Objekte läßt sich auch an jedem Paar stereoskopischer Zeichnungen beobachten, die man entweder mit bloßen Augen oder mit dem Linsenstereoskope vereinigt, wenn man die Zeichnungen einander nähert oder voneinander entfernt. Einen Apparat, um die nötigen Messungen hierbei anstellen zu können, hat H. Meyer[1] angegeben.

Wundt hat direkte Versuche angestellt über die Schätzung der Entfernung nach dem Grade der Konvergenz. Er blickte dabei nach einem schwarzen vertikalen Faden, der vor einem entfernteren gleichmäßig weißen Grunde sich abzeichnete, und zwar blickte er durch einen horizontalen gegen den Faden hin etwas röhrenförmig verlängerten Schlitz mit beiden Augen, so daß er nur den mittleren Teil des Fadens, nicht seine Enden sah, und auch von den seitlich gelegenen Gegenständen nichts, was ihm als Maßstab der Entfernung hätte dienen können. Der Faden war an einem horizontal in der Medianebene des Beobachters ausgespannten Drahte aufgehängt und verschiebbar. Zunächst suchte er die absolute Entfernung zu beurteilen und zu vergleichen mit der Länge eines in der Hand gehaltenen Maßstabes. Die Resultate in Zentimetern angegeben, waren folgende:

Wirkliche Entfernung	Geschätzte Entfernung
180	120
160	92
140	78
120	58
100	48
90	47
80	47
70	37
50	22
40	25

In allen diesen Fällen ist die geschätzte Entfernung kleiner gewesen, als die wirkliche. Ich habe eine ähnliche Versuchsreihe nach etwas abgeändertem Plane und mit dem entgegengesetzten Erfolge gemacht. Dicht vor das Gesicht in die Medianebene hielt ich ein Blatt steifen Papiers und blickte nach einem vertikal herabhängenden Faden. Das Papier verdeckte dem rechten Auge alles, was sich links in einigem Abstande neben dem Faden befand, dem linken Auge, was sich rechts neben dem Faden befand. Näherte ich nun von der rechten Seite her einen Bleistift dem Faden, so sah ich diesen nur mit dem rechten Auge, nicht mit beiden. Ich versuchte dann mit dem Bleistift den Faden zu treffen, indem ich ihn schnell vorschob. Dann ging aber immer der Bleistift hinter dem Faden vorbei. Öffnete ich die vorher geschlossenen Augen, nachdem ich meine Stellung verändert hatte, richtete sie auf den Faden und versuchte dann schnell ihn in der angegebenen Weise zu treffen, so war die Entfernung zwischen Bleistift und Faden gering. Wartete ich länger, indem ich fortdauernd den Faden fixierte, so wurde der Fehler immer größer, wohl wegen steigender Ermüdung der inneren Augenmuskeln.

[1] Poggendorffs Annalen. LXXXV. S. 198—207.

Sehr viel genauer war die Perception der Entfernungsänderung, wenn bei WUNDTS Versuchen der Faden genähert oder entfernt wurde. Die kleinsten wahrnehmbaren Unterschiede waren hierbei in Zentimetern:

Entfernung des Fadens vom Auge	Unterscheidungsgrenze für Annäherung	für Entfernung
180	3,5	5
170	3	4
160	3	3
150	3	3
130	2	3
110	2	2
80	2	2
70	1,5	1,5
50	1	1

Bei 180 cm Entfernung ist jedes Auge um 1° 1′ nach innen gewendet, und eine Annäherung des Fadens um 3,5 cm entspricht einer Verschiebung jedes einzelnen Netzhautbildes um 72 Winkelsekunden. Diese Größe ist schon an der Grenze des durch das Auge Unterscheidbaren. Bei den geringeren Abständen des Fadens werden dagegen erst größere Winkelverschiebungen bemerkt; bei 50 cm Abstand eine solche von 263 Sekunden.*

Übrigens bleibt es bei diesen Versuchen wohl noch zweifelhaft, ob die beiden Augen dem Faden gefolgt und das Netzhautbild auf der Netzhaut ruhend geblieben ist, oder ob die Augen festgehalten wurden und die Verschiebung des Netzhautbildes bemerkt wurde. Die geringere Genauigkeit bei den stärkeren Konvergenzen würde dann daraus zu erklären sein, daß bei vorhandener Konvergenzanstrengung die Lage des Augapfels schwerer festzuhalten ist, als bei unangestrengter Parallelstellung.

Die Unvollkommenheit in der Beurteilung der Entfernung des Fixationspunktes zeigt sich auch, wenn wir bei geschlossenen Augen einen Bleistift in einiger Entfernung vor unserem Gesicht halten und die Augen hinter den Augenlidern auf denselben hinzurichten suchen, so daß wir ihn fixieren, wenn wir bei unveränderter Augenstellung die Augen öffnen. Meist sind sie dann zu wenig konvergent gestellt, und man sieht den Bleistift doppelt, wenn man sie öffnet. Doch gelingt es viel besser sie richtig einzustellen, wie ich schon oben bemerkt habe, wenn man die Spitze des Bleistifts betastet und daran mit der Fingerspitze reibt. Man erhält dann eine deutlichere sinnliche Vorstellung von seinem Orte, und dann gelingt es mir gewöhnlich die geschlossenen Augen so darauf zu richten, daß ich beim Öffnen derselben keine Doppelbilder sehe.

Die Unsicherheit, mit der wir den absoluten Grad der Konvergenz beurteilen und danach die absolute Entfernung des fixierten Objekts, macht sich in vielen Fällen merklich. Wenn man z. B. ein Blatt Papier, auf dem stereoskopische Bilder gezeichnet sind, in der Hand hält und die Bilder kombiniert, so erscheinen dieselben der Regel nach auf oder nahe vor der Fläche des Papiers, dessen Ort wir kennen, zu liegen, während doch die parallel oder nahe parallel gestellten Blicklinien sich erst in sehr großer Entfernung hinter dem Papiere schneiden sollten, und dort der scheinbare Ort des körperlich erscheinenden

* Über die Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung durch Konvergenz vgl. Anm. 7 am Schlusse des Paragraphen. K.

Objekts sein sollte. Ebenso gelingt es in der Regel nicht, negative Nachbilder eines hellen Objekts zu einer körperlichen Anschauung zu kombinieren; sondern sie erscheinen auf die Oberfläche desjenigen reellen Objekts, auf welches die Augen gerade gerichtet sind, projiziert zu sein. Zuweilen indessen, wenn die Nachbilder recht scharf und deutlich sind, und wenn die vorliegende reelle Oberfläche keine hervortretende Zeichnung hat, gelingt es auch wohl das Nachbild mit körperlichen Dimensionen und selbständiger Lage im Raume zu erkennen.

Auch wenn man stereoskopische Zeichnungen im Stereoskop kombiniert, wo man außer ihnen keinen anderen Gegenstand sieht, mit dem man die absolute Entfernung des erscheinenden Raumbildes vergleichen könnte, ist man ziemlich unsicher über die absolute Entfernung desselben; und wenn man die Lage des scheinbar gesehenen Objekts mit der Hand außerhalb des Kastens zu bezeichnen sucht, begeht man ähnliche Fehler, wie WUNDT sie bei der Schätzung der Entfernung des zweiäugig gesehenen Fadens fand. Blickt man dann abwechselnd über dem Instrumente hinweg und durch dasselbe, so kann man leicht die Lage der Hand mit der des stereoskopischen Raumbildes vergleichen und den Fehler schätzen, den man gemacht hat. Auch hierbei finde ich, wie WUNDT, daß ich meist geneigt bin, das Raumbild für näher zu halten, als es ist. Sehr viel besser als mit der nach dem Gefühl bestimmten Lage der nicht gesehenen Hand pflegt dagegen die Vergleichung mit einäugig rechts und links vom Stereoskop gesehenen Objekten zu gelingen. Die Kästen der BREWSTERschen Stereoskope sind meistens nicht so breit, daß man nicht mit dem rechten Auge einige von den rechts liegenden reellen Objekten, mit dem linken links liegende sehen könnte, deren Entfernung und Größe bekannt ist. Trotzdem man diese nur einäugig sieht, und trotzdem die Entfernung des stereoskopischen Raumbildes nur durch das zweiäugige Sehen bestimmt wird, macht man meist ziemlich genaue Bestimmungen, die nicht viel geändert werden, wenn man nachher das Raumbild mit zweiäugig über oder unter dem Stereoskop gesehenen reellen Objekten vergleicht.

Dieses letztere Verfahren zeigt, daß die Beurteilung der Entfernung nach der Konvergenz der Gesichtslinien unter günstigen Umständen und wenn sie durch keinerlei beirrende Einflüsse gestört wird, ziemlich gute Resultate gibt. Aber es ist eines derjenigen Momente der Beurteilung, welches leicht überwogen wird durch andere, die ihm widersprechen, wie in dem vorher zitierten Beispiele der Bilder, die sich auf eine Fläche von bekannter Entfernung projizieren.

Auch die sogenannten Tapetenbilder[1] zeigen unzweideutig den Einfluß der Konvergenz. Wenn man nämlich nach einer Tapete, deren Muster sich gleichmäßig wiederholt, mit konvergenten Blicklinien hinsieht, so gelingt es bei gewissen Graden der Konvergenz entsprechende Teile des Musters zur Deckung zu bringen, entweder das erste mit dem benachbarten zweiten, oder auch das erste mit dem dritten oder vierten. Man sieht alsdann ein verkleinertes Bild der Tapete, welches, dem Beobachter näher, scheinbar in der Luft schwebt, desto näher und kleiner, je größer die Konvergenz ist. Wenn hierbei jeder Teil des Musters sich mit nächstbenachbarten gleich deckt, ist

[1] H. MEYER in ROSER und WUNDERLICHS Archiv. 1842. Bd. I. — D. BREWSTER in *Phil. Mag.* XXX, 305.

das Bild nicht so klein und nah, als wenn er sich mit dem dritten oder vierten gleichen deckt.

Dahin gehört auch der Fall, wo stereoskopische Bilder vereinigt werden, deren korrespondierende Punkte weiter voneinander entfernt sind als die Mittelpunkte der Augen, die also nur bei divergenter Richtung der Blicklinien vereinigt werden können. Beobachter, welche wenig in der Erzeugung divergenter Augenstellungen geübt sind, erreichen dies am besten, wenn sie zwei zusammengehörige stereoskopische Zeichnungen auseinander schneiden, sie dann in ein gewöhnliches Stereoskop einlegen und sie nun langsam voneinander entfernen, während sie sie fortdauernd vereinigt zu sehen suchen. Oder man zeichnet, wie ROLLET[1] und BECKER taten, untereinander auf einem Papier eine Reihe von stereoskopischen Figuren, die einander einzeln kongruent sind, aber immer weiter auseinander rücken. Die genannten Beobachter haben eine Reihe von Figuren gegeben, deren jede einzelne einen größeren Kreis, vor dessen Fläche ein kleinerer liegt, stereoskopisch darstellen. Die Mittelpunkte der kleinen Kreise des nächstfolgenden Paars sind immer so weit voneinander entfernt, wie die der großen des vorausgehenden Paars. Hat man also die letzteren vereinigt, so vereinigen sich auch die kleinen Kreise des nächsten Paars von selbst; von denen gelangt man zur Vereinigung der großen dieses selben Paars, von diesen zur Vereinigung der kleinen eines dritten Paars und so fort. Die Mittelpunkte des ersten Paars kleiner Kreise sind 44 mm distant, die der letzten großen 93 mm, und doch kann ich bei einer Augendistanz von 68 mm auch die letzteren in 30 cm Abstand vereinigen.

In solchen Fällen können sich die Blicklinien nun in gar keinem Punkte des vor uns gelegenen Raums schneiden, sondern nur hinter unserem Kopfe, und dennoch glauben wir ebensogut, wie bei richtiger Distanz der Bilder, ein stereoskopisches Raumbild vor uns zu haben. Höchstens werden wir durch das Gefühl ungewöhnlicher Anstrengung unserer Augen benachrichtigt, daß dieselben eine ungewöhnliche Stellung haben. Und wenn wir ein stereoskopisches Raumbild, welches mit divergenten Sehachsen betrachtet wird, vergleichen mit reellen sehr entfernten Objekten, die über dem Stereoskop sichtbar sind, einer weit entfernten Bergkette z. B., so erscheint uns jenes Raumbild nur eben noch sehr viel weiter entfernt, als die entferntesten reellen Objekte.

Auch wenn wir reelle ferne Objekte durch zwei Prismen ansehen, von etwa vier Grad brechendem Winkel, deren brechende Kanten nach außen gekehrt sind, so müssen wir sie mit divergenten Gesichtslinien betrachten, und sie erscheinen uns wohl etwas entfernter, als mit bloßen Augen, im Ganzen aber doch nicht viel anders. Das unendlich Entfernte macht sich in unseren Gesichtsanschauungen eben nicht geltend als eine Grenze, die nicht überschritten werden könnte. Abnehmende Konvergenz der Gesichtslinien ist für uns Zeichen wachsender Entfernung des Objekts. Diesem Zeichen gemäß urteilen wir auch, wenn die Konvergenz bis zu negativen Werten abnimmt, obgleich dann kein vor uns liegender reeller Raumpunkt solcher Konvergenz mehr entspricht. Selbst wenn wir durch das Gefühl mehr oder weniger sicher wahrnehmen sollten, daß wir mit einer Augenstellung sehen, die bei der normalen

[1] Wiener Sitzungsberichte. 10. Mai 1861. Bd. XLIII. — Kombination bei divergenten Gesichtslinien auch schon früher ausgeführt durch BURCKHARDT in Verhandl. d. naturforsch. Ges. zu Basel. I, 145.

Betrachtung wirklicher Objekte nie vorgekommen ist, so würden wir den Eindruck nach der Regel, der wir bei abnormen Sinneseindrücken zu folgen pflegen, doch immer nur vergleichen können demjenigen, welcher ihm am ähnlichsten ist und sich nur durch geringere Konvergenz der Gesichtslinien davon unterscheidet, dem Eindruck weit entfernter reeller Objekte auf das Auge.

Wegen der Unvollkommenheit, mit der wir den Grad der Konvergenz beurteilen, können nun auch Täuschungen in der Beurteilung der zweiäugig gesehenen Raumformen vorkommen, indem wir eine Interpretation der Gesichtserscheinungen machen, welche für eine andere Konvergenz passend wäre, aber nicht für die wirklich stattfindende richtig ist. Am auffallendsten ist dies an solchen Gegenständen, deren Netzhautbilder bei verschiedenen Graden der Konvergenz gleich guten Sinn haben würden. Man befestige z. B. an einem hoch über und vor unserem Auge gelegenen horizontalen Querbalken in einigen Zollen Entfernung voneinander drei Nägel, hänge an diesen drei feine schwarze Seidenfäden mittels loser weiter Schleifen auf und spanne sie durch kleine Gewichte. Zunächst richte man die Fäden so, daß alle drei in einer Ebene hängen. Dann setze man sich gerade vor die Fäden um Armeslänge von ihnen entfernt, so daß der mittlere in der Medianebene des Gesichtes liegt und die Ebene der Fäden senkrecht zu dieser Medianebene sei. Hinter den Fäden muß sich in größerer Entfernung ein gleichmäßig gefärbter Grund ohne besonders markierte Punkte befinden. Man betrachte die Fäden aufmerksam, ob sie wohl wirklich in einer Ebene zu liegen scheinen; es zeigt sich dann, daß der mittlere scheinbar vor der Ebene der beiden anderen sich befindet, desto mehr je näher man das Gesicht den Fäden bringt. Nun schiebe man den mittleren Faden etwas zurück, so daß die Fäden in einer gegen den Beobachter konkaven Zylinderfläche liegen, und setze sich wieder davor. Betrachtet man sie nun aus größerer Entfernung, so erscheinen sie in einer gegen den Beobachter konkaven Fläche zu liegen; nähert man sich mehr, so wird diese eben, endlich bei noch größerer Annäherung tritt der mittlere Faden, obgleich er hinter der Ebene der beiden anderen liegt, scheinbar vor die Ebene der beiden anderen nach vorn heraus. Die Entfernung, aus der die Fäden als eine Ebene erscheinen, ist für verschiedene Beobachter sehr verschieden. Herr E. Hering, der diesen Versuch durch Anwendung von Fäden verbessert hat, nachdem ich ihn schon zuvor mit Nadeln in der oben beschriebenen Weise ausgeführt hatte, findet, daß er sich um die ganze Länge des Durchmessers des durch die Fäden zu legenden geraden kreisförmigen Zylinders entfernen müsse, um die Fäden in einer Ebene zu sehen, und bringt dies mit seiner Horoptertheorie in Zusammenhang, wovon weiter unten mehr. Ich selbst sehe aus einer solchen Entfernung die Fläche der Fäden noch deutlich konkav gegen mich hin, ebenso die Herren Dr. Berthold, Dr. Bernstein und Dr. Dastich, die in meinem Laboratorium darüber Versuche anstellten. Die Herren Berthold und Dastich mußten sich bis etwa zur Hälfte jenes Durchmessers nähern, ich selbst noch mehr, nämlich auf etwa $^3/_{10}$, ehe ich die Fäden in einer Ebene erblickte; am nächsten mußte Herr Dr. Bernstein herangehen. Das Verhältnis blieb für verschiedene Entfernungen der Fäden voneinander und für verschiedene Abstände des mittleren Fadens von der Ebene der beiden anderen ziemlich dasselbe, so daß Herr Dr. Berthold die Fäden immer dann nahehin eben sah, wenn seine Nasenwurzel etwa in der Achse des Zylinders sich befand, der durch die Fäden zu legen ist, ich selbst aber immer bis nahe, aber nicht ganz

zur Mitte des Radius, oder bis auf ein Viertel des Durchmessers herangehen mußte.

Dabei zeigte sich auch ein Einfluß der Ermüdung der Augen, indem nämlich beim ersten Übergang aus paralleler Richtung zur Konvergenz auf die Fäden der Fehler in der Beurteilung ihrer Lage kleiner ausfällt, und man näher heran zu gehen geneigt ist, um sie eben zu sehen. Bei länger andauernder Konvergenz aber tritt dann der mittlere Faden etwas vor, und man muß wieder weiter zurückgehen.

Hier sind einige Beobachtungsresultate für mein Auge bei längerer Betrachtung erhalten; die Maße sind Millimeter:

Abstand der beiden äußeren Fäden voneinander	Abstand des mittleren von der Ebene der beiden andern	Durchmesser des Zylinders	Distanz, von der ich die Fäden in einer Ebene sah	Distanz in Teilen des Durchmessers
256	10,5	1571	450	0,286
256	6	2737	730	0,267
117	4,2	819	237	0,289
117	8,1	429	129	0,301
120	2	1802	550	0,305

Die Täuschung bei diesen Versuchen erklärt sich aus der oben bemerkten Tatsache, daß, wenn wir nur nach der Konvergenz der Gesichtslinien die Entfernung beurteilen, wir dieselbe gewöhnlich für kleiner halten, als sie wirklich ist und sie überhaupt unsicher beurteilen.

Wenn wir nun auf eine senkrechte durch senkrechte parallele Linien eingeteilte Ebene blicken, so erscheinen die nach rechts hin gelegenen Streifen derselben dem rechten Auge unter größerem Gesichtswinkel als dem linken, weil sie erstens jenem Auge näher sind, und weil zweitens seine Gesichtslinie die genannten Streifen unter einem weniger spitzen Winkel trifft, als die des linken Auges. Umgekehrt erscheinen die nach links gelegenen Streifen dem linken Auge breiter, als dem rechten. Je näher die Augen der besagten Ebene kommen, desto größer werden die Differenzen der Gesichtswinkel für den gleichen Streifen. Um nun entscheiden zu können, ob die wahrgenommenen Differenzen dieser Art der Projektion einer ebenen Fläche oder einer gekrümmten angehören, müßte man die Entfernung des Objekts nach der Konvergenz der Gesichtslinien sehr genau schätzen können. Denn die gleichen Differenzen der beiderseitigen Bilder würde auch ein entfernteres Objekt zeigen können, wenn es gegen den Beobachter konvex wäre, oder ein näheres, wenn es gegen den Beobachter konkav wäre. Daß wir nun das gesehene zweiäugige Bild bei den beschriebenen Versuchen so interpretieren, als gehörte es einem entfernteren Objekte an, rührt, wie ich glaube, nicht oder wenigstens nicht allein davon her, daß wir die Entfernung des Objekts unter ähnlichen Umständen meist als zu groß schätzen, wie die oben beschriebenen Versuche bei dem Zielen mit dem einäugig gesehenen Bleistift auf den zweiäugig gesehenen Faden zeigen; denn in der Tat müßte der Irrtum über die Entfernung größer sein, als er wirklich sich bei jenen Versuchen herausstellt, wenn er die gleiche Änderung in der scheinbaren Form des Raumbildes geben sollte. So würden wir in dem ersten Falle der oben angegebenen Beobachtungen die Entfernung auf 627 mm statt auf 450, in dem dritten auf 350 statt auf 237 schätzen müssen. So groß habe ich die Irrtümer nie gefunden. Ich glaube vielmehr, daß wir hier eine falsche Auslegung machen, weil ein anderer Umstand wegfällt, der sonst unser Urteil unter-

stützt. Wenn wir nämlich nicht bloß gleichmäßig fortlaufende gerade Linien in ähnlicher Lage wie die Fäden bei dem zuletzt beschriebenen Versuche vor Augen haben, sondern Linien, welche deutlich sichtbare Merkpunkte darbieten, oder Objekte, an denen auch horizontale Grenzlinien vorkommen, so erscheinen uns die vertikalen Längen, welche dem rechten Auge näher liegen, unter größerem Gesichtswinkel, als dem linken Auge und umgekehrt.

Daß diese Unterschiede in den vertikalen Dimensionen für beide Augen in Betracht kommen, zeigt evident die Vergleichung der stereoskopischen Figuren auf Taf. I *A* und *B*. Das Figurenpaar *A* zeigt die beiden Projektionen einer nahe vor dem Gesicht befindlichen, schachbrettartig gemusterten Ebene und erscheint als Ebene. Das Paar *B* dagegen zeigt die beiden Projektionen einer schachbrettartig gemusterten, weit entfernten und zylindrisch gekrümmten Fläche und erscheint als solche. Nun sind die vertikalen Linien in dem einen Paar Zeichnungen genau so weit voneinander entfernt, wie die entsprechenden vertikalen Linien in dem anderen Paare von Zeichnungen. Wenn also die scheinbare Krümmung nur von der gegenseitigen Lage der vertikalen Linien abhinge, wie man bisher meist vorausgesetzt hat[1], so müßten beide Zeichnungen genau dieselbe Flächenkrümmung darbieten. An und für sich entspricht die relative Lage der vertikalen Linien aber ebensogut einem nahe liegenden ebenen, wie einem entfernteren konvexen Schachbrett, und erst die Führung der queren Linien gibt für die eine oder andere Deutung den Ausschlag. Umgekehrt sind in Taf. I Fig. *C* die horizontalen Distanzen der Vertikallinien überall gleich groß, die begrenzenden Querlinien aber gekrümmt und am äußeren Rande der Figuren weiter voneinander entfernt, als am innern, wie es in den Bildern einer nahen konkaven Fläche der Fall sein würde. Aus der Kombination beider Zeichnungen entsteht auch wirklich das binokulare Bild einer gegen den Beobachter konkaven Fläche, trotz paralleler Stellung der Blicklinien, die einem nahen Objekte nicht entspricht. Wenn wir hier nur nach den Unterschieden in horizontaler Richtung urteilen wollten, die ganz fehlen, so müßte *C* als ein ebenes Schachbrett erscheinen. Die unpassende Konvergenz stört hier ebensowenig, wie bei der Betrachtung der Doppelzeichnung *A* Taf. I, wo wir urteilen, daß wir eine nahe ebene Fläche vor uns haben, trotzdem die dazu nötige Konvergenz fehlt. Die Ähnlichkeit der beiden Bilder *A* mit denen einer nahen Ebene entscheidet unsere Deutung trotz des Gefühls unpassender Konvergenz.

Wenn man nun die Bilder so wählt, daß Verschiedenheiten in den vertikalen Dimensionen für beide Augen gar nicht vorkommen können, also z. B. wie in dem oben besprochenen Versuche drei vertikale Fäden, ganz gleichmäßig fortlaufend und ohne Merkpunkte, betrachtet, so fällt ein Teil derjenigen Zeichen fort, an denen wir sonst die Nähe der Bilder erkennen. Die Differenzen, welche die horizontalen Abstände der Fäden in den beiden Netzhautbildern zeigen, sind nicht begleitet von den sonst immer gleichzeitig vorkommenden entsprechenden vertikalen Differenzen, oder wenigstens sind letztere nicht wahrnehmbar, und da wir in der Beurteilung der Nähe durch Konvergenz nicht sehr sicher sind, so beurteilen wir die drei Fäden wie ein Objekt, welches etwas ferner ist, und an dem alsdann die vorhandenen Differenzen der horizontalen Dimensionen nur vorkommen können, wenn es gegen den Beobachter konvex ist.

---

[1] Und wie es namentlich Herr E. Hering als Grundgesetz des binokularen Sehens ausgesprochen hat.

Da bei verschiedenen Individuen die Sicherheit der Beurteilung der Entfernung durch Konvergenz sehr verschieden ist, so erklärt es sich, daß die Täuschung an den drei vertikalen Fäden bei verschiedenen Individuen sehr verschiedenes Maß hat. Bei Herrn E. Hering ist die Täuschung am meisten entwickelt, bei demselben scheint aber auch die Beurteilung der Entfernung nach der Konvergenz der Gesichtslinien besonders unvollkommen zu sein, da er sie nach seinen eigenen Beobachtungen ganz zu leugnen geneigt ist.

Zur Prüfung der gegebenen Erklärung habe ich auf die drei schwarzen Fäden kleine Goldperlen aufgezogen, und dieselben in Zwischenräumen von etwa 4 cm voneinander befestigt. Sie dienten als Merkpunkte an den Fäden, die auch im indirekten Sehen deutlich sichtbar waren. Die oben beschriebene Täuschung war danach bis auf einen geringen Rest geschwunden. Während ich bei drei ganz schwarzen Fäden, deren äußere 256 mm voneinander entfernt waren, und die aus 450 mm Entfernung betrachtet wurden, den mittleren 10,5 mm hatte zurückschieben müssen, um sie eben zu sehen, brauchte ich ihn nach Anbringung der Perlen nur 2 mm zurückzuschieben. Bei 120 mm Abstand der äußeren Fäden, wobei der mittlere 2 mm zurückgeschoben war, mußte ich früher 550 mm abgehen, nach Anbringung der Perlen nur 230 mm.

Auch wenn man den drei schwarzen Fäden irgendeinen anderen Gegenstand nahe bringt, der hinreichend viele Merkpunkte darbietet, so erkennt man die Krümmung der Fläche, in der die Fäden hängen, selbst wenn der genäherte Gegenstand an sich gar keine geraden Linien zur Vergleichung darbietet. Ich benutzte dazu z. B. einen *S*-förmig gekrümmten ausgeschnitzten Papierschneider, und selbst wenn ich seinen am stärksten gekrümmten Rand den Fäden zuwendete, ließ er die Täuschung über deren Stellung fast ganz schwinden.

Da es sehr schwierig ist, außer durch Maschinen eine hinreichend genaue Übereinstimmung der vertikalen Linien in stereoskopischen Bildern hervorzubringen, habe ich Versuche über den Einfluß der Konvergenz noch in folgender Weise angestellt. Ich habe zwei rechtwinkelige Prismen nebeneinander befestigt, so daß ihre Querschnitte wie die rechtwinkeligen Dreiecke in Fig. 54 liegen, daß ihre Kanten einander parallel und zwei ihrer Kathetenflächen unter einem kleinen Winkel α gegeneinander geneigt sind. Trifft der Strahl af bei b nahehin senkrecht auf eine Kathetenfläche solcher Prismen, so wird der Strahl zweimal bei c und d reflektiert, wie die Figur anzeigt, und tritt schließlich aus der letzten Fläche in der Richtung eg von seiner ersten Richtung aus um einen Winkel abgelenkt, der das Doppelte des Winkels α beträgt.[1] Wenn man in

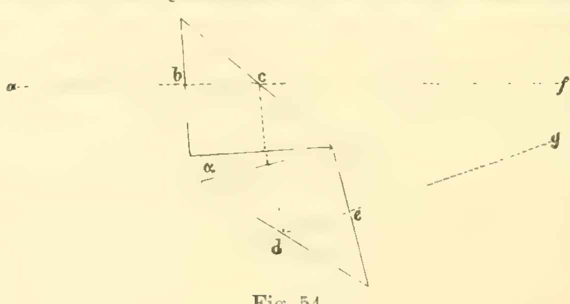


Fig. 54.

[1] Es ist hierbei keine Verzerrung des Bildes durch die Brechung an den Glasflächen zu fürchten, wie sie bei schiefwinkeligen Prismen vorkommt und bei stereoskopischen Versuchen sehr störend werden kann, weil die Veränderungen nur derselben Art sind, wie sie beim Sehen senkrecht durch eine dicke planparallele Glasplatte vorkommen; in der Mitte des Bildes verschwindend klein und nach den Seiten hin symmetrisch, so daß sie bei den hier zu machenden Versuchen nicht stören können.

der angegebenen Weise durch ein solches Doppelprisma bei senkrechter Stellung seiner Kanten blickt, so sieht man genau dasselbe Netzhautbild, wie mit bloßem Auge, aber um es zu sehen, muß man das Auge etwas mehr nach rechts oder links wenden, als es ohne das Prisma nötig wäre.

Blickt man durch ein solches Prisma nach drei parallelen vertikalen Fäden, die in einer Ebene sich befinden und deren mittelster daher den unbewaffneten Augen ein wenig vor die Ebene der beiden anderen vorzutreten scheint, so muß man die Augen, je nachdem man die Fläche *b* oder *e* des Prismas ihm zukehrt, mehr konvergieren oder mehr divergieren lassen, als vorher, sieht aber genau dieselben Netzhautbilder. Im Falle die Divergenz vergrößert wird, erscheint der mittlere Faden noch stärker vortretend als bisher; im Falle die Konvergenz vermehrt wird, tritt er in die Ebene der anderen scheinbar zurück, oder sogar hinter dieselbe. Da die Prismenzusammenstellung eine ganz geringe telestereoskopische Wirkung hat, so bringe man für Konvergenz die Fläche *e* vor das rechte, für Divergenz *b* vor das rechte Auge; oder man bringe nacheinander beide Flächen vor das linke Auge; die telestereoskopische Wirkung des kleinen Apparats ist in den ersten beiden Fällen gleich, wo der Abstand der Gesichtspunkte durch die Prismen vergrößert wird, und ebenso in den letzteren beiden Fällen, wo dieser Abstand verkleinert wird.

Aus diesem Versuche folgt, daß dieselben Netzhautbilder die Vorstellung eines konkaven, ebenen oder konvexen Objekts hervorbringen, je nachdem die Konvergenz der Augen größer oder kleiner ist, daß also die Konvergenz bei solchen Objekten wohl beachtet wird.*

Andererseits betrachte man durch die Prismenkombination eine ebene mit deutlich sichtbaren Figuren oder Buchstaben bedeckte Fläche, deren Netzhautbilder daher nur bei einem bestimmten Konvergenzgrade einem wirklichen Objekte entsprechen können, so wird man dieselbe auch bei vermehrter oder verminderter Konvergenz eben sehen. In einem solchen Falle können die Netzhautbilder nur einem bestimmten Objekte angehören, und die Anschauung dieses Objekts entsteht auch bei unpassender Konvergenz. Ähnlich verhält es sich bei den Fäden mit Perlen; auch da ist die Wirkung der vermehrten Konvergenz und Divergenz sehr unbedeutend, und man beobachtet hauptsächlich nur die telestereoskopische Wirkung der scheinbar vermehrten Distanz der Gesichtspunkte.

Ganz anders wirken die gewöhnlichen einfachen Prismen von schwachem brechenden Winkel. Wenn man durch die Mitte eines solchen unter dem Minimum der Ablenkung blickt, die brechende Kante der Nase zugekehrt, so erscheinen alle Objekte nach innen abgelenkt und erfordern erhöhte Konvergenz zu ihrer Betrachtung. Aber gleichzeitig erscheinen alle Vertikallinien nasenwärts konkav, die schläfenwärts gelegenen Teile des Bildes zu schmal, die nasenwärts gelegenen zu breit, Horizontallinien dagegen nach der Nasenseite divergierend. Daraus folgt, daß, wenn das rechte Auge durch ein solches Prisma blickt, die Objekte zweiäugig gesehen, näher erscheinen und so, daß sowohl ihre geraden Horizontallinien wie ihre geraden Vertikallinien gegen den Beschauer konkav erscheinen. Durch die scheinbare Vergrößerung der vertikalen Abstände an der inneren Seite werden die Unterschiede der natürlichen Projektion, wonach die jenseits der Medianebene gelegenen Teile des Objekts

* Vgl. über die hier behandelte Frage Anm. 8 am Schlusse des Paragraphen. K.

scheinbar kleiner sind, zum Teil oder ganz ausgeglichen. Das Objekt erscheint ungefähr in derselben Entfernung wie vorher, oder auch trotz der vermehrten Konvergenz etwas größer und ferner. Unter diesen Umständen kann die Verbreiterung der nasenwärts gelegenen und Verschmälerung der schläfenwärts gelegenen Teile des Bildes nur auf eine konkave Wölbung desselben bezogen werden. Die Krümmung der Vertikallinien bedingt die scheinbare Konkavität derselben.

Kehrt man die scharfe Kante des Prismas nach außen, so erscheinen ebene Objekte im Gegenteil konvex gegen den Beobachter.

Mit den hier betrachteten Erscheinungen, wobei zweiäugig Bilder von Objekten bei bald vermehrter, bald verminderter Konvergenz der Augen betrachtet werden, hängt auch die Möglichkeit zusammen, Reliefbilder der Objekte zu konstruieren, welche bei geringerer Entfernung und bei geringeren Tiefendimensionen als das Original doch den Eindruck des letzteren nach seinen wirklichen Formen und Dimensionen, seiner wirklichen Beschattung, und zwar nicht nur für monokulare, sondern selbst für binokulare Betrachtung nachahmen, indem sie annähernd auch dieselben Unterschiede beider Netzhautbilder herstellen, wie sie die Betrachtung des Originals selbst ergeben würde. Eben deshalb ist ein Reliefbild aus dem richtigen Standpunkte angesehen eine sehr viel vollkommenere Art der Nachahmung, wenigstens der Form des Objekts, als es das vollkommenste ebene Bild je sein kann. Es gehören dahin nicht nur die Basreliefs und Hautreliefs der Skulptur, welche menschliche Köpfe, Figuren und Figurengruppen darstellen, sondern auch Theaterdekorationen, welche Landschaften oder Zimmer, Kirchenportale, welche perspektivisch verkürzte Säulenhallen darstellen usw.

Man kann die empirisch von den Künstlern[1] gefundenen Regeln der Reliefkonstruktionen aus einem einfachen stereoskopischen Versuche herleiten. Man bringe eine stereoskopische Doppelzeichnung, deren beide Bilder aber auf getrennten Papierstücken ausgeführt sind, zunächst in solcher Lage zur Vereinigung, daß sie bei richtig gewähltem Konvergenzgrade der Augen gerade denselben Anblick wie das Original gewähren. Dann nähere man beide Bilder einander, aber so, daß beide in derselben Ebene bleiben. Dabei wächst die Konvergenz der Gesichtslinien, während die Netzhautbilder der beiden Bilder keine, oder wenigstens nur unverhältnismäßig kleine Veränderungen erleiden, und der sinnliche Eindruck bleibt also, abgesehen von der verhältnismäßig undeutlichen Wahrnehmung der vermehrten Konvergenz, fast derselbe wie zuvor. Denken wir uns nun das Objekt konstruiert, welches in der neuen Lage der Bilder diesen entsprechen würde, so ist dieses ein Reliefbild des Originalobjekts. An dem Relief ist zu unterscheiden eine Hauptebene (Ebene des Hintergrundes), in die alle die unendlich weit entfernten Punkte des Originals zu liegen kommen, und eine ihr parallele Kongruenzebene, in der die Punkte liegen, die mit ihrem Bilde zusammenfallen. Wenn das Relief dem Beschauer das Original in natürlicher Größe darstellen soll, muß die Kongruenzfläche durch die Augen des Beschauers gehen. Will man dagegen den Anblick des Originals nicht in natürlicher Größe, sondern den eines verkleinerten oder vergrößerten Modells desselben wiedergeben, so kann die Kongruenzfläche auch anders gelegt werden, so daß der Gesichtspunkt, welcher den Mittelpunkt beider Augen des Beobachters repräsentiert, nicht in ihr liegt.

[1] J. A. Breysig, Versuch einer Erläuterung der Reliefperspektive. Magdeburg 1798.

Alle Ebenen des Originals bleiben im Reliefbild Ebenen, alle geraden Linien bleiben gerade Linien.

Alle Ebenen des Originals und alle geraden Linien, die der Kongruenzfläche parallel sind, bleiben dieser und sich selbst parallel auch im Relief.

Alle anderen einander parallelen Ebenen des Originals schneiden sich im Relief in einer geraden Linie des Hintergrundes.

Alle parallelen Geraden des Originals, die nicht der Kongruenzfläche parallel sind, schneiden sich in einem Punkte des Hintergrundes.

Alle Ebenen und Geraden, die durch den Gesichtspunkt gehen, behalten ihre Lage bei auch im Reliefbild.

Endlich, wenn f und φ die Abstände beziehlich eines Punktes des Originals und seines Bildes von der Kongruenzfläche bezeichnen und g den Abstand des Hintergrundes von der Kongruenzfläche, so ist

$$\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{f} = \frac{1}{g}$$

die Gleichung, welche den Abstand φ gibt; dieselbe, welche den Abstand des Bildes φ von einer Konkavlinse von der Brennweite $-g$ ergeben würde.

Ganz wie in den Bildern einer solchen werden die Bilder entfernter Gegenstände sehr nahe zusammengerückt, während die von näheren Objekten relativ größere Tiefendimensionen erhalten. Eine Konkavlinse zeigt also ein richtig konstruiertes **Reliefbild** der durch sie gesehenen Objekte.

Wenn man die Kongruenzebene und die Ebene des Hintergrunds zusammenfallen läßt, so wird aus dem Reliefbild ein perspektivisches ebenes Bild.

In den Reliefbildern werden gleich gut wahrnehmbare Teile der Tiefendimensionen dargestellt durch gleichgroße Tiefenunterschiede; und in diesem Sinne können wir sagen, daß wir die objektive Welt binokular wie in einem Reliefbild sehen. Wie in einem solchen sind selbst große Abstände sehr entfernter Gegenstände voneinander, in Richtung der Tiefe genommen, nur sehr schwach wahrnehmbar, während selbst kleine Tiefenabstände naher Objekte deutlich ausgedrückt sind.

Schließlich habe ich noch gewisse Fehler zu besprechen, welche bei der Beurteilung von Linienrichtungen beim zweiäugigen Sehen eintreten, und auf welche E. Hering aufmerksam gemacht hat. Wenn man nämlich nach einem langen vertikal hängenden Faden hinsieht, der sich vor einer entfernteren gleichmäßig angestrichenen Wand befindet, welche keine deutlich sichtbaren Merkpunkte oder Linien darbietet, nach denen man sich über die Lage der Vertikale oder Horizontale orientieren könnte, den Faden selbst aber so lang macht, daß man seinen oberen und unteren Endpunkt nicht sehen kann, oder aber ihn durch einen Hohlzylinder von der Breite des Gesichts hindurch betrachtet, der den Anblick seiner Enden und seitlicher Gegenstände ausschließt, so kann man bei zweiäugiger Betrachtung doch noch beurteilen, ob der Faden wirklich vertikal sei oder nicht, und wenn er nicht vertikal erscheint, ihn durch Verschiebung seines unteren Endes vertikal zu machen suchen. Dabei zeigt es sich, wie ich übereinstimmend mit Hering[1] finde, daß, wenn bei der gewählten Kopfstellung die horizontale Visierebene sich in ihrer Primärlage und der Faden sich in der Medianebene befindet, der wirklich vertikale Faden auch für vertikal

[1] Beiträge zur Physiologie. Heft V. S. 297.

gehalten wird. Wenn man dagegen den Kopf nach hintenüber gebeugt hat, so daß die Visierebene unterhalb ihrer Primärlage sich befindet, während der Faden in der Medianebene bleibt, so muß man das untere Ende des Fadens vom Beobachter entfernen. Ist umgekehrt der Kopf vornübergeneigt und die Visierebene über ihrer Primärlage, so muß man das untere Ende des Fadens dem Beobachter nähern, damit der Faden vertikal erscheine.

Wenn der Faden sich nicht in der Medianebene befindet, sondern rechts von derselben, so erscheint er bei aufrechter Kopfhaltung, wenn die horizontale Visierebene in ihrer Primärlage befindlich ist, wieder vertikal, wenn er wirklich vertikal ist, und wieder muß sein unteres Ende genähert werden, wenn der Kopf vornüber gebeugt wird. Um die Ebene annähernd zu bestimmen, in der er geneigt werden muß, um vertikal zu erscheinen, habe ich um den unteren Teil des Fadens einen zweiten gelegt, der eine lose Schlinge bildete, und mittels dieses zweiten den ersten so an mich herangezogen, daß jener vertikal schien. Wenn ich dann nach dem horizontalen Faden herabblickte, wobei der vertikale in stark divergierenden Doppelbildern erscheint, halbierte gewöhnlich der horizontale den Winkel dieser Doppelbilder, woraus folgt, daß der vertikal erscheinende Faden, wenigstens nahehin, soweit die hier erreichbare Genauigkeit zu beurteilen zuläßt, in der den Konvergenzwinkel halbierenden Vertikalebene liegen mußte.

Bei hintenüber geneigtem Kopfe dagegen mußte ich das untere Ende des Fadens von mir wegziehen, wobei die Richtung des ziehenden Fadens aber, so weit erkennbar, dieselbe blieb, wie vorher.

Die Erklärung dieser Tatsachen scheint mir zusammenzuhängen mit dem im vorigen Paragraphen S. 215 erwähnten Umstande, daß bei konvergierenden Augen die Richtung und Lage der gesehenen Objekte so beurteilt wird, als wenn das Auge eine der mittleren Sehrichtung parallele Richtung und die entsprechende Raddrehung hätte. Die stattfindende Konvergenz der Augen wird hierbei nicht berücksichtigt. Wenn wir diese auf den hier vorliegenden Fall übertragen, so würde folgen, daß diejenigen Linien vertikal zur Visierebene erscheinen, welche sich abbilden auf solchen Meridianen des Auges, welche bei der Stellung des Auges parallel der mittleren Sehrichtung wirklich vertikal sein würden zur Visierebene.

Wenn der Fixationspunkt in der Medianebene liegt, so wird die mittlere Sehrichtung der Medianebene parallel sein, und bei Augen, die dem Listingschen Gesetze folgen, keine Drehung um ihre Längsachse bedingen. Also werden die in der Primärstellung zur Visierebene vertikalen Meridiane auch bei geneigter Visierebene zu dieser normal sein, solange die Augen der mittleren Sehrichtung, also der Medianebene parallel gerichtet sind. Geht man aber zur Konvergenzstellung über, so werden sie bei nach unten geneigter Visierebene sich so drehen, daß die vorher senkrechten Medianebenen derselben nach oben hin konvergieren, umgekehrt bei nach oben geneigter Visierebene. Die Schnittlinie jener beiden Meridianebenen würde die scheinbar zur Visierebene senkrechte Linie sein, welche im ersteren Falle nach oben, im anderen nach unten sich dem Beobachter nähert.

Bei den seitlich nach unten oder oben geneigten Blickrichtungen sind aber nicht mehr dieselben Meridiane der Augen zur Visierebene normal, wie in der Primärstellung. Daß auch der scheinbar vertikale Faden sich in beiden Augen nicht auf den in der Primärstellung vertikalen Meridianen abbildet, kann man

leicht erkennen, wenn man gerade vor sich an der Wand einen vertikalen Streifen befestigt, der deutliche Nachbilder liefert. Diese Nachbilder bilden dann zum Teil sehr große Winkel mit dem scheinbar vertikalen Faden, sobald man diesen fixiert. Der scheinbar vertikale Faden scheint also hier zu liegen in denjenigen Meridianen, welche bei der der mittleren Sehrichtung parallelen Blickrichtung vertikal sein würden[1].

Zu bemerken ist aber, daß nach VOLKMANNS Versuchen, die ich selbst bestätigt finde, bei mangelnder Raddrehung und monokularem Sehen die scheinbar zum Netzhauthorizont vertikalen Meridiane auch absolut vertikal erscheinen, während beim binokularen Sehen die vertikale Linie entsprechen muß den beiden zur Visierebene absolut vertikalen Meridianen. Beim binokularen Sehen hebt sich also der einander entgegengesetzte Einfluß, den die Neigung der scheinbar vertikalen Meridiane beider Augen auf die Beurteilung der Stellung einer Senkrechten haben könnte, gegenseitig auf. Daß dies für die Neigungen nach rechts und links hin geschieht, erklärt sich leicht; zu bemerken aber ist, daß für die Beurteilung der Neigung der gesehenen Linie nach vorn oder nach hintenüber die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane ohne Wirkung bleibt. Wir werden im nächsten Abschnitte sehen, daß diese Abweichung sich wahrscheinlich an der Anschauung horizontaler Linien erzeugt hat, und daraus erklärt sich dann, daß sie uns nicht über vertikale Linien täuscht.

Ein ähnlicher Irrtum über die Tiefendistanz kommt nun übrigens nicht bloß bei solchen Linien vor, die durch den Fixationspunkt gehen und in der Medianebene liegen, sondern auch bei anders gerichteten Linien, die durch den Fixationspunkt gehen und nur nahehin senkrecht zur mittleren Sehrichtung sind. Die scheinbare Lage solcher Linien entspricht dem vorher aufgestellten Gesetze. Wir deuten sie so, als wenn wir dieselben Netzhautbilder erhalten hätten bei einer Stellung der Augen, parallel der mittleren Sehrichtung.

In dieser Beziehung hat RECKLINGHAUSEN gezeigt, daß, wenn man auf einer ebenen Fläche einen Stern zeichnet, aus einer Anzahl von Linien bestehend, die sich in einem Punkte schneiden, und man diesen Mittelpunkt fest mit nach oben gerichtetem Blick fixiert, die nach oben gerichteten Strahlen des Sterns in einer konkaven Kegelfläche zu liegen scheinen, die nach unten gerichteten in einer konvexen; umgekehrt, wenn man den Kreuzungspunkt der Strahlen mit nach unten gerichtetem Blicke fixiert. Ich finde die Täuschung noch auffallender, wenn man die nahehin horizontalen Strahlen wegläßt und statt der auf Papier gezeichneten Linien feine glatte Drähte benutzt, die man in einem Korke so feststeckt, daß sie von einem Punkte aus divergieren und in einer Ebene liegen.

Der Theorie nach, welche aus dem oben angeführten Gesetze hergeleitet ist, müssen die besagten Linien scheinbar in einer Kegelfläche zweiten Grades liegen, deren Spitze im Fixationspunkte liegt, die ferner durch die beiden Blicklinien geht und deren Durchschnitt mit der durch die Mittelpunkte der

[1] Herr E. HERING hat diese Erscheinungen mit der Horopterlehre in Verbindung gebracht, wovon im folgenden Paragraphen mehr. Ich bemerke, daß die vertikal zur Visierebene erscheinenden Linien bei mir **nie** im Horopter liegen, sondern stets in gekreuzten Doppelbildern erscheinen. Da bei Herrn HERINGS Augen die Abweichung der zum Netzhauthorizont wirklich und scheinbar vertikalen Meridiane fehlt oder sehr gering ist, so wird seine Regel für sein Auge, wenigstens in den Medianstellungen, von denen er spricht, individuelle Richtigkeit haben.

Augen senkrecht zur Visierebene gelegten Ebene eine Ellipse ist, deren vertikale Achse etwas größer ist, als die horizontale.

Recklinghausen hat auch durch Versuche die Lage solcher Linien ermittelt, die zur mittleren Sehrichtung bei gehobenem oder gesenktem Blicke senkrecht erschienen. Er benutzte dazu einen feinen glatten Draht, der in der Mitte mittels eines feinen Charniergelenks so verstellt werden konnte, daß er verschiedene Neigung gegen die mittlere Sehrichtung (Halbierungslinie des Konvergenzwinkels erhielt. Das Gelenk, was ihn trug, war andererseits an einer runden Eisenstange befestigt, welche in der Verlängerung der mittleren Sehrichtung lag und um ihre Längsachse gedreht werden konnte. Durch Drehung um diese Achse konnte der Ebene, in welcher der Draht sich bewegte, verschiedene Neigung gegen die Visierebene gegeben und bei jeder Stellung dieser Ebene die Stellung des Drahtes gesucht werden, bei welcher sein oberes und unteres Ende gleich weit vom Beobachter entfernt schien.

Die Theorie fordert für die genannten Lagen des Drahtes wiederum eine durch den Fixationspunkt und die Blicklinien gehende Kegelfläche zweiten Grades. Die Messungen von Recklinghausen stimmten sehr gut mit dieser Folgerung der Theorie. Er nannte diese Fläche die Normalfläche, weil in ihr die zur mittleren Sehrichtung scheinbar normalen Linien liegen.

Diese Normalfläche würde für solche Augen, welche keine Abweichung des scheinbar vertikalen Meridians haben, mit der im nächsten Paragraphen zu untersuchenden Horopterfläche für Linien, die durch den Fixationspunkt gehen, zusammenfallen. Dagegen ist sie mit dieser nicht identisch bei Augen, deren scheinbar vertikale Meridiane nicht mit den wirklich vertikalen zusammenfallen[1], wie sich im nächsten Abschnitte zeigen wird.

Wenn man ein System konzentrischer Kreise auf ein Blatt zeichnet und bei konvergierenden Gesichtslinien und geneigter Blickebene deren Mittelpunkt fixiert, so erhalten diese Kreise ebenfalls eine kleine scheinbare Drehung um ihre horizontale Achse in demselben Sinne, wie die vertikalen Linien, aber von geringerer Größe. Hat man nun einen vertikalen Diameter der Kreise hinzugefügt, so wird dieser stärker geneigt, als die Kreise, und löst sich scheinbar von ihnen los. Bei gehobener Blickebene erscheint das obere Ende des Durchmessers dem Beobachter näher als die Ebene der Kreise, das untere entfernter. Umgekehrt bei gesenkter Blickebene.

Da die horizontal verlaufenden Bögen der Kreise keine sichere binokulare Anschauung geben, erscheinen sie auch zuweilen winkelig verbogen und dem Durchmesser anzuhaften.

Auch dieser Versuch gelingt sehr viel leichter, wenn man Kreise und Durchmesser aus sehr feinen Drähten zusammenfügt. Die hierbei vorkommende Täuschung erfordert, daß der Beobachter am Bilde die stattgefundene Drehung der Augen nicht erkennen könne. Auf einem Papierblatte sind in der Regel Merkpunkte genug, an denen der Beobachter erkennt, daß er zwei gegeneinander gedrehte Bilder desselben Objekts vor sich hat. Die Objekte für die hier beschriebenen Versuche müssen so beschaffen sein, daß sie auch unter

[1] Recklinghausen selbst hat diesen Unterschied nicht gemacht; denn obgleich er die Abweichung des scheinbar vertikalen Meridians entdeckt hat, hat er den Einfluß dieser Abweichung auf die Lage der identischen Stellen noch nicht gekannt.

Voraussetzung kleiner Drehungen ihres Netzhautbildes noch eine reelle Deutung zulassen. Wir fanden oben ein ähnliches Verhältnis für die Erkennung der Konvergenz aus gewissen Eigentümlichkeiten der Bilder.*

Regeln der stereoskopischen Projektion.

Es sei in Fig. 55 die Ebene des Papiers die Visierebene, in der P und Q die Mittelpunkte der Visierlinien für beide Augen darstellen. Es sei AB der Durchschnitt einer stereoskopischen Zeichnung, deren Ebene normal sowohl zur Visierebene als zur Medianebene des Kopfes sei, der gewöhnlichen Haltung entsprechend, in der man stereoskopische Zeichnungen zu betrachten pflegt. CD sei die Medianlinie der Visierebene, S ein darzustellender Punkt, der auch außerhalb der Visierebene liegen kann; in diesem Falle stellt das S in der Zeichnung den Fußpunkt des von ihm auf die Visierebene gefällten Perpendikels dar. Um die Projektion des Punktes S in den beiden Zeichnungen zu finden, ziehe man die Linien SP und SQ, welche die Ebene der Zeichnung in R und T schneiden. Die letzteren beiden Punkte sind diejenigen, in welchen S beziehlich für das Auge P oder Q darzustellen ist. Um die Lage dieser Punkte zu bezeichnen, wollen wir rechtwinkelige Koordinaten benutzen, welche beziehlich der Visierebene, der Medianebene und der Ebene der zu machenden Zeichnung parallel seien, deren Mittelpunkt O der Durchschnittspunkt der drei genannten Ebenen ist. Und zwar sei OA die Richtung der positiven x, OD die der positiven z, die y senkrecht zur Ebene des Papiers. Bezeichnen wir demgemäß die Koordinaten

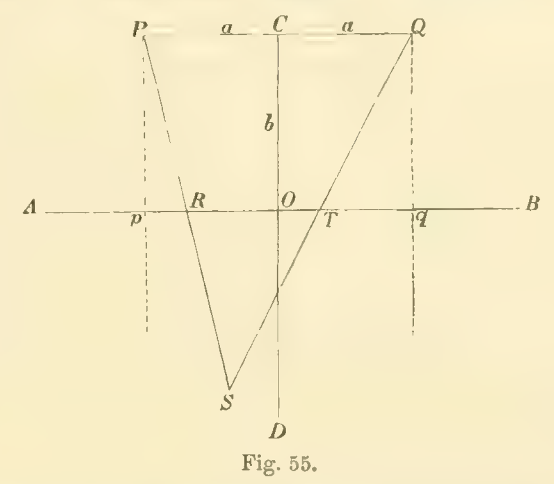


Fig. 55.

1. des Punktes P mit $x = +a$, $z = -b$, $y = 0$

2. des Punktes Q mit $x = -a$, $z = -b$, $y = 0$

3. des Punktes S mit $x = \alpha$, $y = \beta$, $z = \gamma$

4. des Punktes R mit $x = \xi_0$, $y = v_0$, $z = 0$

5. des Punktes T mit $x = \xi_1$, $y = v_1$, $z = 0$,

so sind die Bedingungen dafür, daß die Punkte P, R, S in einer geraden Linie liegen,

* Eine große Anzahl neuerer Untersuchungen sind über die Verhältnisse des Augenmaßes für Entfernungen und absolute Größen angestellt worden. S. hierüber Anm. 9 am Schlusse des Paragraphen. K.

$$\frac{\alpha - a}{\alpha - \xi_0} = \frac{\beta}{\beta - v_0} = \frac{\gamma + b}{\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

und die Bedingungen, daß *Q, T, S* in einer geraden Linie liegen,

$$\frac{\alpha + a}{\alpha - \xi'} = \frac{\beta}{\beta - v'} = \frac{\gamma + b}{\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2).$$

Zunächst zeigt sich, daß

$$v = v' = \frac{\beta b}{\gamma + b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,a),$$

daß also in beiden Bildern die Höhen entsprechender Punkte über der Horizontallinie *AB* gleich groß sein müssen.

Die beiden Gleichungen ergeben ferner

$$\xi_0 = \alpha - \frac{\gamma(\alpha - a)}{\gamma + b} = \frac{\alpha b + \gamma a}{b + \gamma}$$

$$\xi_1 = \alpha - \frac{\gamma(\alpha + a)}{\gamma + b} = \frac{\alpha b - \gamma a}{b + \gamma}.$$

Die Differenz ε dieser beiden Werte

$$\varepsilon = \xi_0 - \xi_1 = \frac{2\gamma a}{b + \gamma} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,b)$$

ist unabhängig von den Werten von α und β; sie ist also für alle Objektpunkte dieselbe, welche als in gleicher Entfernung hinter der Ebene der Zeichnung liegend angenommen werden. Diese Differenz $(\xi_0 - \xi_1)$ bezeichnet die Größe der Verschiebung, welche die Punkte der einen Zeichnung im Vergleich zu denen der andern nach rechts oder nach links hin erlitten haben. Dabei ist angenommen, daß die Zeichnungen so aufeinander gelegt sind, daß Punkte, die in dieser Ebene der Zeichnung selbst gedacht werden (z. B. die Linie, welche die Zeichnung einrahmt), aufeinander fallen. In vielen Fällen ist es dagegen passender, die Zeichnungen so zu vergleichen, daß unendlich weit entfernte Punkte aufeinander fallen, z. B. die Punkte *p*, *q*, welche durch die beiden parallel mit *CD* gerichteten Blicklinien *Pp* und *Qq* getroffen werden. Setzen wir $\gamma = \infty$, so wird nach Gleichung 1b)

$$\varepsilon_\infty = 2a,$$

und setzen wir

$$e = \varepsilon_\infty - \varepsilon$$

und

$$b + \gamma = \varrho,$$

so ist

$$e = \frac{2ab}{\varrho} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,c.$$

In dieser Gleichung bezeichnet $2a$ die Distanz beider Augen, b den Abstand der Zeichnung, ϱ den Abstand des Objekts von einer Ebene, die durch die Mittelpunkte beider Augen senkrecht zur Visierebene gelegt ist. Für alle reellen, vor den Augen liegenden Punkte muß e immer positiv sein, weil $2a$, b und ϱ immer positiv sind. Dabei liegt in dem Bilde für das rechte Auge jeder nähere Punkt mehr nach links als in dem des linken Auges. Zugleich läßt die Gleichung 1c erkennen, daß die stereoskopische Differenz e für

sehr große Abstände ϱ sehr klein ist und erst für kleine Werte von ϱ groß wird.

Den Umstand, daß die Größe von e gleich groß ist für Gegenstände, die alle in derselben, der Ebene der Zeichnung parallelen Ebene liegen, hat O. N. Rood[1] benutzt, um ein Instrument zu konstruieren, mit dem man von gegebenen einzelnen perspektivischen Zeichnungen beliebiger Objekte ein Paar zusammengehörige stereoskopische Zeichnungen kopieren kann. Das Original, mit Öl transparent gemacht, wird auf einer horizontalen Glasplatte befestigt und von unten her beleuchtet. Darauf wird ein ebener viereckiger Rahmen gelegt, dessen untere Seite mit Schreibpapier überzogen ist. Dieser Rahmen kann mittels einer Stellschraube um kleine Distanzen von rechts nach links verschoben werden. Man zeichnet nun zunächst eine Zeichnung vollständig nach, ohne die Stellung des Rahmens zu verändern, und die andere so, daß man mit den ganz vorn befindlichen Linien beginnt und dann zu den nächst entfernteren übergeht und so fort. Bei jedem Übergange aber zu entfernteren Punkten verschiebt man den Rahmen, der die Kopie trägt, ein wenig, entsprechend dem Tiefenabstande. So erhält man zwei Zeichnungen, welche stereoskopisch kombiniert ein körperliches Relief zeigen.

Wenn zwei Punkte von verschiedenem Abstande $\varrho_,$ und $\varrho_{,,}$ stereoskopisch projiziert sind und die entsprechenden stereoskopischen Differenzen mit $e_,$ und $e_{,,}$ bezeichnet werden, so ist

$$e_, - e_{,,} = 2ab\left(\frac{1}{\varrho_,} - \frac{1}{\varrho_{,,}}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2a).$$

Nehmen wir hierin für $e_, - e_{,,}$ den kleinsten in der Zeichnung erkennbaren Abstand, so erhalten wir zusammengehörige Werte der Abstände $\varrho_,$ und $\varrho_{,,}$, welche an der Grenze der erkennbaren Unterschiede liegen. Setzen wir zur Abkürzung

$$\frac{2ab}{e_, - e_{,,}} = f,$$

so wird die Gleichung 2a)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\varrho_,} - \frac{1}{\varrho_{,,}}$$

die oben für diesen Fall gegebene Formel. Wenn wir die mittlere geometrische Proportionale zwischen $\varrho_,$ und $\varrho_{,,}$ mit $\mathfrak{r}$ bezeichnen, so läßt sich die letzte Formel auch schreiben

$$\varrho_{,,} - \varrho = \frac{\mathfrak{r}^2}{f},$$

d. h. die stereoskopisch unterscheidbaren Unterschiede der Entfernung wachsen wie die des Quadrats der mittleren Entfernung $\mathfrak{r}$.

Um die Veränderungen zu übersehen, welche das stereoskopische Relief bei verschiedenen Verschiebungen der Bilder liefert, müssen wir die scheinbaren Koordinaten des Objektpunktes α, β, γ ausdrücken durch die Koordinaten seiner beiden Bilder $\xi_,$, $\xi_{,,}$, v. Aus den obigen Gleichungen 1 und 2) ergibt sich

$$\frac{\alpha - a}{\alpha - \xi_0} = \frac{\alpha + a}{\alpha - \xi_1}$$

[1] *American Journal of Science and Arts.* Vol. XXXI. p. 71. Jan. 1861.

oder

$$\alpha = \frac{a(\xi_1 + \xi_0)}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

$$\beta = \frac{2va}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

$$\gamma = \frac{b(\xi_0 - \xi_1)}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

oder wenn wir wie vorher die stereoskopische Differenz

$$2a + \xi_1 - \xi_0 = e$$

setzen und das arithmetische Mittel von ξ_0 und ξ_1 mit $\mathfrak{x}$ bezeichnen, so ist

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \mathfrak{x}\frac{2a}{e} \\ \beta &= v\frac{2a}{e} \\ \varrho = \gamma + b &= b\frac{2a}{e} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3a).$$

Wenn wir ein Paar zusammengehöriger stereoskopischer Zeichnungen beide nach einer Seite bewegen, also $\mathfrak{x}$ vergrößern, während e, v, b unverändert bleiben, so vergrößern sich die Werte von α, während β und ϱ unverändert bleiben. Die Vergrößerung von α ist aber im Verhältnis $\frac{2a}{e}$ größer als die von $\mathfrak{x}$. Eliminieren wir die stereoskopische Differenz e aus der ersten und dritten Gleichung, so wird

$$\alpha = \varrho \cdot \frac{\mathfrak{x}}{b}\cdot$$

Die Vergrößerungen von α sind also auch proportional der scheinbaren Entfernung ϱ des Objektpunktes; d. h. also die Punkte, welche vor der Verschiebung scheinbar gerade hintereinander lagen, d. h. gleiche Werte von $\mathfrak{x}$ hatten, liegen nach der Verschiebung in einer geraden Linie, die durch den mitten zwischen den Mittelpunkten beider Augen liegenden Punkt zu ziehen ist.

Wenn wir ein Paar zusammengehöriger stereoskopischer Zeichnungen, die auf einem Blatte ausgeführt sind, von dem Auge entfernen, also b vergrößern, während $\mathfrak{x}$, v, e und a unverändert bleiben, so bleiben die Werte von α und β unverändert, die Tiefendimension ϱ aber wächst in demselben Verhältnisse wie b. Man beobachtet dies in der Tat leicht, wenn man ein solches Paar stereoskopischer Bilder mit parallelen Gesichtslinien zur Koinzidenz bringt; ihr Relief wird desto tiefer, je weiter man die Bilder vom Auge entfernt.

Um endlich die Veränderungen übersehen zu können, welche eintreten, wenn man die stereoskopischen Zeichnungen einander nähert oder voneinander entfernt, schreiben wir die Gleichungen 3a) in folgender Form

$$\left.\begin{aligned} \frac{\alpha}{\varrho} &= \frac{\mathfrak{x}}{b} \\ \frac{\beta}{\varrho} &= \frac{v}{b} \\ \frac{1}{\varrho} &= \frac{e}{2ab} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3b)$$

und bemerken dabei, daß $2\mathfrak{x} = \xi_0 + \xi_1$ und $e = 2a + \xi_1 - \xi_0$ ist. Wenn man nun das rechte Bild nach links, das linke nach rechts schiebt um die Länge η, so verkleinert man ξ_0 und vergrößert ξ' um die Länge η, folglich bleibt $\mathfrak{x}$ (so wie auch v) ungeändert, während der Wert von e um 2η wächst. Nennen wir nun α_1, β_1 und ϱ_1 die Werte von α, β, ϱ, welche nach dieser Verschiebung gelten, so verwandeln sich die Gleichungen 3b) in folgende

$$\frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\mathfrak{x}}{b}, \qquad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{v}{b}$$

$$\frac{1}{\varrho_1} = \frac{e + 2\eta}{2ab}.$$

Drückt man in diesen nun $\mathfrak{x}$, v und e durch ihre Werte in 3b) aus, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\alpha}{\varrho}, \qquad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{\beta}{\varrho} \\ \frac{1}{\varrho_1} = \frac{1}{\varrho} + \frac{\eta}{ab} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.$$

Hierin sind α, β, ϱ die ursprünglichen Koordinaten des betreffenden Objektpunktes, bezogen auf ein Koordinatensystem, dessen Mittelpunkt in der Mitte zwischen den Mittelpunkten beider Augen liegt und den wir den Gesichtspunkt nennen wollen, α_1, β_1 und ϱ_1 sind die entsprechenden Koordinaten für die scheinbare Lage des Punktes, welche er nach der gegenseitigen Näherung der richtigen stereoskopischen Projektionen hat. Durch die Gleichungen 4) ist für jeden Punkt die Lage seines Bildes nach solcher Verschiebung eindeutig gegeben. Die ersten beiden Gleichungen sagen aus, daß der scheinbare und wahre Ort des Punktes beide in der gleichen vom Mittelpunkt der Koordinaten aus gezogenen geraden Linie liegen. Die dritte Gleichung zeigt an, daß seine Entfernung von der durch beide Augen gelegten Vertikalebene verändert, und zwar bei positiven Werten von η verringert ist. Setzen wir die Größe $\frac{ab}{\eta} = p$, so wird die letzte Gleichung

$$\frac{1}{\varrho_1} = \frac{1}{\varrho} + \frac{1}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4\text{a})$$

dieselbe, welche die Entfernungen des Objekts ϱ und seines Bildes ϱ_1 für eine Konkavlinse von der Brennweite p geben würde.

Für unendlich weit entfernte Punkte wird $\varrho = \infty$ und $\varrho_1 = p$.

Es bezeichnet also p die Entfernung der Ebene, auf der sich alle unendlich weit entfernten Punkte des Originals abbilden, welche wir mit Breysig die Hauptebene nennen können.

Wenn der Objektpunkt α, β, ϱ irgendeinen Punkt einer bestimmten Ebene bezeichnet, also für ihn eine Gleichung von der Form existiert

$$A\alpha + B\beta + C\varrho + D = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5),$$

so ergibt sich aus den Gleichungen 4) und 4a)

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + \left[C - \frac{D}{p}\right]\varrho_1 + D = 0 \quad \ldots\ldots \quad 5\text{a}).$$

Die Bildpunkte liegen also auch in einer Ebene: und wenn $A = B = 0$, das heißt die Ebene des Originals der durch beide Augen gehenden Vertikalebene $\varrho = 0$ parallel ist, so ist die Bildebene derselben Ebene also auch ihrem Original parallel. Wenn andererseits $D = 0$ ist, das heißt die Originalebene durch den Mittelpunkt der Koordinaten, oder den Gesichtspunkt geht, so fällt die Bildebene ganz mit ihrem Original zusammen.

Wenn wir im Original eine Schar paralleler Ebenen haben, deren Gleichung in der Form 5) gegeben ist und die einzeln dadurch unterschieden sind, daß D für jede einen anderen Wert hat, so reduziert sich die Gleichung 5a) für die Bildebenen, wenn man darin $\varrho_1 = p$ setzt, auf

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + Cp = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\mathrm{c},$$

welche unabhängig von D ist. Das heißt die Abbilder aller jener parallelen Ebenen schneiden die Ebene $\varrho_1 = p$ (die Hauptebene) in derselben geraden Linie, deren Gleichung in 4c) gegeben ist.

Die Abbilder einer Schar paralleler Ebenen schneiden sich also entweder einander und die Hauptebene gar nicht, oder sie schneiden sich und die Hauptebene alle in einer geraden Linie, ihrer Fluchtlinie. Da nach der vorher gemachten Bemerkung diejenige in jener Schar paralleler Ebenen, welche durch den Mittelpunkt des Koordinatensystems geht, mit ihrem Bilde zusammenfallen muß, so muß diese Ebene auch die Hauptebene in der Fluchtlinie schneiden. Um die Fluchtlinie einer Schar paralleler Ebenen zu finden, lege man ihnen parallel also eine Ebene durch den Gesichtspunkt; diese schneidet die Hauptebene in der gesuchten Fluchtlinie.

Wenn wir ferner die Gleichungen 4) in die Form setzen

$$\alpha_1 - \alpha + \frac{\alpha\varrho_1}{p} = 0, \qquad \beta_1 - \beta + \frac{\beta\varrho_1}{p} = 0,$$

$$\varrho_1 = \frac{\varrho\, ab}{ab + \varrho\, t},$$

so ergibt sich, daß für $\varrho = 0$, sein muß

$$\varrho_1 = \varrho = 0, \qquad \alpha_1 = \alpha, \qquad \beta_1 = \beta,$$

daß also für jeden Punkt der Ebene $\varrho = 0$ des Abbild mit dem Original zusammenfällt.

Nennen wir diese Ebene $\varrho = 0$ die Kongruenzebene (Breysigs Bildebene), so ist das Bild jeder Ebene A des Originals zu konstruieren, indem man eine Ebene legt durch die Schnittlinien von A mit der Kongruenzebene und die zu A gehörige Fluchtlinie.

Gerade Linien des Originals sind zu betrachten als Schnittlinien je zweier Ebenen. Ihr Bild muß die Schnittlinie der Abbilder beider Ebenen, also wieder eine gerade Linie sein. Eine Schar paralleler gerader Linien kann angesehen werden als das System der Schnittlinien von zwei Scharen paralleler Ebenen. Die Abbilder dieser Ebenen müssen sich beziehlich mit der Hauptebene in den beiden zugehörigen Fluchtlinien schneiden, und ihre Schnittlinien, das heißt die Abbilder aller jener parallelen geraden Linien des Originals werden durch den Schnittpunkt beider Fluchtlinien gehen müssen, wenn die beiden Fluchtlinien sich überhaupt schneiden, was sie nicht tun würden, wenn die Schar der gegebenen geraden Linien der Hauptebene und Antlitzebene parallel wäre.

Die Abbilder paralleler gerader Linien, wenn sie der Hauptebene nicht parallel sind, schneiden diese also in einem Punkte, dem Fluchtpunkte.

Dieser Fluchtpunkt für eine gerade Linie des Originals, die der Hauptebene nicht parallel ist, wird gefunden, wenn man durch den Gesichtspunkt mit der betreffenden Geraden eine Parallele legt; wo diese die Hauptebene schneidet, ist der Fluchtpunkt.

Das Abbild einer geraden Linie des Originals findet man, indem man ihren Schnittpunkt mit der Kongruenzebene durch eine Gerade mit dem zugehörigen Fluchtpunkte verbindet.

Man sieht, dies sind genau dieselben Konstruktionsregeln, welche für Reliefbilder vorgeschrieben worden sind, mit der einzigen Ausnahme, daß bei Reliefbildern die Ebene, deren Punkte mit ihren Bildern zusammenfallen (Breysigs Bildebene), nicht notwendig durch die Augen selbst geht. Diese Bedingung ist nämlich nur dann notwendig zu erfüllen, wenn die Größe des durch das Reliefbild dargestellten Gegenstandes unverändert erscheinen soll.

Denkt man sich nämlich sämtliche Koordinaten der Punkte des Originals proportional verkleinert oder vergrößert, setzt man also in die Gleichungen 4) statt

$$\alpha, \qquad \beta, \qquad \varrho,$$

beziehlich

$$n\alpha, \qquad n\beta, \qquad n\varrho,$$

so verwandeln sich die Gleichungen 4) in

$$\left.\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\alpha}{\varrho}, \qquad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{\beta}{\varrho} \\ \frac{1}{\varrho'} = \frac{1}{n\varrho} + \frac{1}{p} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6).$$

Wenn ϱ unendlich ist, wird $\varrho_1 = p$, also die Ebene $\varrho' = p$ ist die Hauptebene, in der die unendlich entfernten Punkte abgebildet werden.

Wenn im Original die Ebene

$$A\alpha + B\beta + C\varrho + D = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

besteht, so erhält man mittels der Gleichungen 6) für das Bild

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + \left(C - D\frac{n}{p}\right)\varrho_1 + Dn = 0 \quad \ldots\ldots \quad 5\text{b}).$$

Wenn $D = 0$, so ist die zweite Gleichung identisch mit der ersten und die Originalebene fällt mit ihrem Bilde zusammen. Dieser Bedingung genügen die Ebenen, welche durch den Punkt $\alpha = \beta = \varrho = 0$ gehen, der also die Bedeutung des Gesichtspunktes hat. Endlich schneiden sich die Ebenen 5) und 5b), wo

$$\left.\begin{aligned} D = Dn - Dn\frac{\varrho_1}{p} \\ \text{oder} \qquad \varrho_1 = p \cdot \frac{n-1}{n} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5\text{c}).$$

Die durch die Gleichung 5c) gegebene Ebene, die den Gesichtspunkt nicht enthält, ist also die Kongruenzebene. Sobald also das Relief nach den gewöhnlich angenommenen Regeln konstruiert ist und der Gesichtspunkt nicht in der

Kongruenzebene liegt, so ist es, aus dem richtigen Gesichtspunkte betrachtet, optisch ähnlich der Darstellung eines verkleinerten oder vergrößerten Modells des Originals, in welchem der Gesichtspunkt des Beobachters seine relative Lage behalten hat. Dabei ist dann der Gesichtswinkel, unter dem das Reliefbild erscheint, noch derselbe wie für das Original. Wenn die Kongruenzebene zwischen Beobachter und Relief liegt, entspricht letzteres einem linear vergrößerten Objekte, wenn die Bildebene dagegen hinter dem Beobachter liegt, einem linear verkleinerten Objekte.

Wenn die Kongruenzebene sich der Hauptebene unendlich nähert ($n = \infty$), so verwandelt sich das Reliefbild in eine ebene perspektivische Zeichnung.

Die Veränderungen, welche scheinbar vor sich gehen, wenn man zwei richtige stereoskopische Abbildungen eines Objekts in ihrer eigenen Ebene einander nähert oder entfernt, sind also von derselben Art, wie sie bei der Ausführung von Reliefbildern des Originals stattfinden. Man beobachtet die Erscheinung auch leicht an stereoskopischen Bildern, wenn man die angegebenen Bewegungen ausführt, und kann durch dieses Mittel leicht die gewünschte richtige Tiefenanschauung des Objekts hervorbringen. Doch ist zu bemerken, daß wir auch, ohne den Bildern die richtige Entfernung zu geben, bei bekannten Objekten meistens die richtige Tiefenanschauung bilden, weil wir nicht sehr empfindlich für den absoluten Wert der Konvergenz unserer Gesichtslinien sind, und eben deshalb leicht, wenn andere Vergleichungspunkte fehlen, so urteilen, als hätten unsere Blicklinien den Grad der Konvergenz, der einer richtigen Tiefenanschauung des Objekts entsprechen würde.

Es ist hierbei freilich zu bemerken, daß bei einer solchen Verschiebung stereoskopischer Bilder nicht bloß der Grad der Konvergenz der Gesichtslinien geändert wird, sondern auch die Ansicht der Bilder selbst, weil bei unveränderter Fixation derselben Punkte die Gesichtslinien, wenn sie vor der Verschiebung senkrecht auf der Fläche des Bildes waren, es nach der Verschiebung nicht mehr sind und daher auch das Bild sich etwas anders auf die Netzhaut projiziert. Es läßt sich aber leicht einsehen, daß, wenn wir die Bilder selbst so drehen wollen, daß ihr Netzhautbild unverändert bleibt, die nach entsprechenden Punkten der Bilder gezogenen geraden Linien sich größtenteils nicht mehr schneiden würden, und also kein reeller Punkt gleichzeitig den beiden Punkten in den Zeichnungen entsprechen würde. Wie die Projektion des Bildes in solchen Fällen geschieht, kann erst im folgenden Abschnitte bei der Lehre vom Horopter ermittelt werden.

Wenn man stereoskopische Bilder durch konvexe oder konkave Linsen ansieht, welche dicht vor die beiden Augen des Beobachters gestellt sind, und deren Mittelpunkte gleichweit voneinander entfernt sind wie die Mittelpunkte beider Augen, so wachsen dadurch die Größen e, $\mathfrak{x}$ und v der Gleichungen 3a) in demselben Maße, wie die scheinbare Entfernung des Bildes b; es bleiben demnach die Werte der Größen α, β und ϱ ungeändert. Solche Linsen verändern also nicht die scheinbare Lage und Größe des stereoskopischen Reliefs. Es ist dies wichtig wegen der Brillengläser, welche, wenn sie richtig gestellt sind, keine Größenveränderung im Gesamtbilde hervorbringen, trotzdem jedes einzelne optische Bild in der Tat vergrößert oder verkleinert ist.

Damit aber Brillengläser richtige Größen und Entfernungen der Objekte zeigen, ist es wesentlich nötig, daß ihre optischen Mittelpunkte gerade so weit voneinander entfernt sind, wie die Knotenpunkte der parallel gestellten Augen.

Wenn in Fig. 56 a_0 der optische Mittelpunkt eines konkaven Brillenglases ist, b das Objekt, $a_0 f_0$ die optische Achse des Glases, so liegt das Bild β_0 von b in der Verbindungslinie von a_0 mit b; und wenn man von b und β_0 die Lote $b f_0$ und $\beta_0 \varphi_0$ auf die optische Achse fällt, die Brennweite des Glases mit p bezeichnet und alsdann setzt

$$a_0 f_0 = r \qquad a_0 \varphi_0 = s,$$

so ist nach den Theoremen des § 9, B. I, S. 71:

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{s} = - \frac{1}{p}.$$

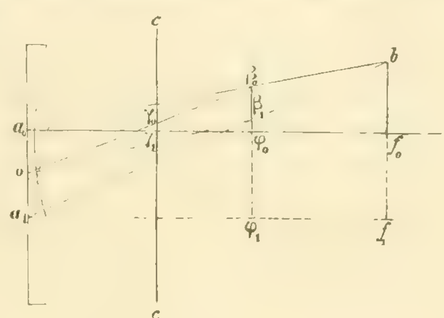


Fig. 56.

Dadurch ist die Lage von β_0 gegeben. Wenn nun die Linse parallel ihrer Hauptebene verschoben wird, so daß ihr optischer Mittelpunkt in a_1 und ihre optische Achse in $a_1 f_1$ liegt, so wird das Bild von b in die Verbindungslinie von b mit a_1 rücken, übrigens in dem Lote $\varphi_0 \beta_0$ bleiben. Das Bild verschiebt sich also um die Länge

$$\beta_0 \beta_1 = a_0 a_1 \times \frac{\varphi_0 f_0}{a_0 f_0} = \alpha \cdot \frac{r - s}{r},$$

wenn wir die Verschiebung des Glases $a_0 a_1 = \alpha$ setzen. Daraus folgt mit Hilfe der obigen Gleichung zwischen r und s

$$\beta_0 \beta_1 = \alpha \frac{s}{p} = \alpha \frac{r}{r + p}.$$

Denken wir uns dicht hinter den Konkavlinsen bei o ein Auge stehend, welches nach den Bildern β_0 und β_1 hinblickt und diese Bilder auf die feste Ebene cc projiziert in γ_0 und γ_1, so ist die scheinbare Verschiebung der Projektion auf dieser Ebene, deren Abstand von a_0 wir mit A bezeichnen wollen,

$$\gamma_0 \gamma_1 = \beta_0 \beta_1 \cdot \frac{A}{s} = \frac{\alpha A}{p},$$

also unabhängig von der Lage des Objekts b. Die Verschiebung des optischen Bildes bei Verschiebung der Konkavlinse von a_0 nach a_1 ist also gerade dieselbe, als wenn man eine perspektivische Zeichnung des Objekts auf der Ebene cc um die Größe $\gamma_0 \gamma_1$ verschöbe. Denken wir uns die Projektionsebene cc im Brennpunkte der Linse, machen wir also $A = p$, so wird $\gamma_0 \gamma_1 = \alpha$, also gleich der wirklichen Verschiebung des Glases.

Die Erscheinungen, welche entstehen, wenn Brillengläser vor den Augen seitwärts verschoben werden, sind also dieselben, welche bei gegenseitiger Entfernung oder Näherung stereoskopischer Zeichnungen sich zeigen. Der Versuch bestätigt vollkommen diese Folgerung der Theorie. Stehen die Zentren der Konkavbrillengläser einander näher als die Augenmittelpunkte, so erscheinen die Gegenstände zu nah, im anderen Falle zu weit. Bei Konvexbrillen ist es umgekehrt, weil p das entgegengesetzte Vorzeichen hat.

Es ist dieser Umstand bei der Verfertigung der Brillen[1] wohl zu beachten.

[1] Die stereoskopischen Erscheinungen, zu denen Brillengläser Veranlassung geben, sind genauer untersucht von F. C. Donders in *Anomalies of accommodation and refraction.* London 1864. p. 152—169.

namentlich auch deshalb, weil eine fortgesetzte angestrengte Haltung des Auges leicht Schmerzen im Auge und im Kopfe hervorbringt. Konkavbrillen, deren optische Mittelpunkte nicht weit genug voneinander entfernt sind, zwingen die Augen fortdauernd zu konvergieren; sind die Mittelpunkte im Gegenteile zu weit entfernt, so muß der Beobachter divergieren. Am schlimmsten ist es, wenn ein Mittelpunkt höher als der andere liegt. Namentlich die Nasenklemmer sind in dieser Beziehung oft falsch konstruiert. Wenn die optischen Mittelpunkte der Gläser in der Mitte ihrer Fläche sitzen, so sind sie einander zu nah und zwingen zum dauernden Konvergieren. Auch Höhenabweichungen treten leicht ein, weil der Klemmer sich in der Regel nicht ganz horizontal auf dem Nasenrücken festsetzt.

Blickt man nach wirklichen Objekten durch zwei parallel gestellte Teleskope, z. B. Binocles, so erhält man denselben Erfolg, als wenn man die entsprechenden stereoskopischen Zeichnungen dem Auge nähert; die Gesichtswinkel werden für alle Teile des Bildes gleichmäßig vergrößert. Das entspricht nun, wie wir oben für diesen Fall bei den Zeichnungen gesehen haben, einer Annäherung und Verkürzung der Tiefendimensionen des Objekts ohne Veränderung seiner zur Gesichtslinie senkrechten Dimensionen. Durch Binocles erscheinen also die Objekte genähert, übrigens in natürlicher Größe, aber verflacht, als Basrelief. Das ist auch an menschlichen Gesichtern deutlich zu erkennen; sie nehmen immer einen unnatürlichen, halb bildartigen Ausdruck an.

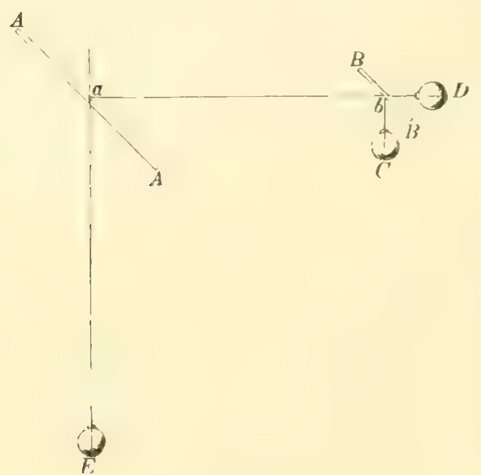


Fig. 57.

Die Theorie des Telestereoskops ergibt sich leicht, wenn man bedenkt, daß ein Beobachter die Objekte in einem Planspiegel so sieht, nur symmetrisch von rechts nach links umgekehrt, wie das Spiegelbild des Beobachters die wirklichen Gegenstände durch das Glas des Spiegels hindurch sehen würde.

Es sei AA Fig. 57 der erste, BB der zweite Spiegel, C das Auge des Beobachters. Das Auge C sieht im ersten Spiegel BB die Dinge so, wie das Spiegelbild D dieses Auges sie durch BB hindurch sehen würde. Dabei muß die Entfernung $Cb = Db$ sein. Das Spiegelbild D sieht wieder die Dinge im Spiegel AA so, wie sie E, das von AA entworfene Spiegelbild, von D durch AA hindurch sehen würde, und der Ort von E ist dadurch bestimmt, daß Ea längs des reflektierten Strahls gemessen gleich Da längs des einfallenden gemessen sein muß. Daraus folgt, wie schon oben erwähnt ist, daß das Auge C durch die zwei Spiegel die Landschaft so sieht, wie sie von E aus direkt gesehen erscheinen würde. Nun ist die stereoskopische Differenz e zweier Bilder, projiziert auf eine Zeichnung in der Entfernung b, wie Gleichung 1c) lehrt,

$$e = \frac{2Ab}{r},$$

wo $2A$ die Entfernung der beiden Gesichtspunkte bezeichnet, und $\mathfrak{r}$ die Entfernung des Objekts von der gemeinsamen vertikalen Ebene beider Augen. Jene Entfernung $2A$ ist im Telestereoskop die Entfernung der beiden von je zwei Spiegeln entworfenen Spiegelbilder der Augen des Beobachters ($r_1\, \varrho_1$ der Fig. 57, S. 284). Setzen wir nun diesen Wert von e in die Gleichungen 3a), so wird, wenn unendlich entfernte Punkte mit parallelen Gesichtsachsen gesehen werden:

$$\alpha = \mathfrak{x}\frac{a}{A}\frac{\mathfrak{r}}{b} = \mathfrak{x}\frac{\varrho}{b}$$

$$\beta = v\frac{a}{A}\frac{\mathfrak{r}}{b} = v\frac{\varrho}{b}$$

$$\varrho = b\frac{a}{A}\frac{\mathfrak{r}}{b}.$$

Danach verhalten sich also α, β, ϱ zueinander beziehlich wie $\mathfrak{x}$, v, b, welche letzteren wir als die wirklichen Entfernungen ansehen können, aber die scheinbare Entfernung ϱ ist kleiner als $\mathfrak{r}$ im Verhältnis $\frac{a}{A}$, und in demselben Verhältnisse sind also auch die übrigen scheinbaren Dimensionen reduziert. Die Landschaft erscheint also dann, wie ein richtig konstruiertes verkleinertes Modell.

Dasselbe gilt für photographische Landschaftsbilder, wenn wir für $2A$ die Entfernung der beiden Punkte nehmen, an denen sich der Mittelpunkt des Objektivglases der *Camera obscura* bei den beiden photographischen Aufnahmen befunden hat. Bei der Anordnung des Stereoskops ist darauf zu achten, daß unendlich entfernte Punkte der Photographien mit parallelen Gesichtslinien kombiniert werden, und daß die Abstände der Platte von dem Auge oder den Linsen des Stereoskops gleich denen der Platte in der *Camera obscura* von dem Objektivglase derselben sein müssen; sonst bekommt man ein falsches Relief. Beide Bedingungen sind gewöhnlich in den käuflichen Stereoskopen und den dazu gehörigen Bildern nicht erfüllt.

Recklinghausens Normalfläche. Man denke sich ein rechtwinkeliges Koordinatensystem, dessen Mittelpunkt im Fixationspunkte liegt, die xy-Ebene in der Visierebene; die zx-Ebene sei die Medianebene des Körpers. Die Koordinaten des rechten Auges seien:

$$x = a \qquad y = b \qquad z = 0,$$

die des linken Auges:

$$x = a \qquad y = -b \qquad z = 0,$$

so daß $2b$ die Distanz der Mittelpunkte beider Augen bezeichnet, a den Abstand des Fixationspunktes von der Verbindungslinie der Augenmittelpunkte.

Die Blicklinie des rechten Auges ist gegeben durch die Gleichungen

$$\frac{x}{a} - \frac{y}{b} = 0 \quad \text{und} \quad z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1),$$

die Blicklinie des linken Auges durch die Gleichungen

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 0 \quad \text{und} \quad z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1a).$$

Bildet man aus den beiden Gleichungen 1 durch Multiplikation der ersten mit dem konstanten Faktor p und Addition der zweiten die neue Gleichung

$$p\left(\frac{x}{a}-\frac{y}{b}\right)+z=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1\,b),$$

so ist dies die Gleichung einer Ebene, die durch die rechte Blicklinie geht, denn für alle Punkte dieser Blicklinie sind die beiden Gleichungen 1), folglich auch 1 b) erfüllt. Nach bekannten Sätzen ist der Kosinus des Winkels α, den die Normale dieser Ebene mit der z-Achse, oder die Ebene selbst mit der Visierebene, $z=0$, macht, gegeben durch die Gleichung

$$\cos\alpha=\frac{1}{\sqrt{1+\frac{p^2}{a^2}+\frac{p^2}{b^2}}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,c).$$

Bilden wir entsprechend aus den Gleichungen 1 a) die neue

$$-p\left(\frac{x}{a}+\frac{y}{b}\right)+z=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1\,d),$$

so geht diese durch die linke Blicklinie und der Wert von $\cos\alpha$ ist für sie derselbe, wie in 1 c).

Aus 1 c) folgt

$$p=\frac{\operatorname{tang}\alpha}{\sqrt{\frac{1}{a^2}+\frac{1}{b^2}}}$$

oder wenn wir setzen

$$a=r\cos\gamma, \qquad b=r\sin\gamma,$$

wo γ der halbe Konvergenzwinkel, und r die Entfernung jedes Auges vom Fixationspunkte ist:

$$p=r\operatorname{tang}\alpha\sin\gamma\cdot\cos\gamma,$$

wonach die Gleichungen 1 b) und 1 d) werden:

$$(x\sin\gamma-y\cos\gamma)\operatorname{tang}\alpha+z=0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,b)$$

$$-(x\sin\gamma+y\cos\gamma)\operatorname{tang}\alpha+z=0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,d).$$

Subtrahiert man die zweite von der ersten, so erhält man

$$x\sin\gamma=0,$$

d. h., die Schnittlinie der beiden Ebenen 1 b) und 1 d) liegt in der durch den Fixationspunkt, senkrecht zur Visierebene und zur Medianebene gelegten Ebene $x=0$, welches auch der Winkel α sei. Diese Schnittlinie sei eine gesehene Linie, dann sind die beiden Ebenen 1 b) und 1 d) die Ebenen ihrer Richtungsstrahlen.

War nun die bisher betrachtete Stellung der Augen eine ohne Raddrehung, so können wir übergehen zu einer Stellung mit Raddrehung, indem wir in 1 b) den Winkel α und δ vergrößern, in 1 d) um ebensoviel verkleinern. Dann bekommen wir für die neue Lage beider Ebenen:

$$\operatorname{tang}(\alpha+\delta)=\frac{z}{y\cos\gamma-x\sin\gamma}$$

$$\operatorname{tang}(\alpha-\delta)=\frac{z}{y\cos\gamma+x\sin\gamma}.$$

Bilden wir hieraus die Tangente der Differenz beider Winkel, so erhalten wir:

$$\operatorname{tang} 2\delta = \frac{2zx\sin\gamma}{y^2\cos\gamma^2 - x^2\sin^2\gamma + z^2}$$

oder

$$z^2 + y^2\cos^2\gamma - x^2\sin^2\gamma - 2zx\sin\gamma\cdot\operatorname{cotang}(2\delta) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2),$$

welches die Gleichung eines Kegels ist, dessen Spitze im Mittelpunkt der Koordinaten liegt. Aus der Gleichung 2) erhellt nämlich, daß wenn x, y, z Werte sind, die der Gleichung 2) genügen, auch nx, ny und nz genügen; daraus folgt, daß jede durch einen Punkt der Fläche 2) und den Anfangspunkt der Koordinaten gezogene gerade Linie ganz in der Fläche 2) liegt, daß diese also ein Kegel ist.

Die in den Gleichungen 1) und 1a) angegebenen Werte der Koordinaten für die Blicklinien genügen ebenfalls der Gleichung 2). Die Kegelfläche geht also durch die Blicklinien.

Da nun nach den oben aufgestellten Grundsätzen bei medianem Fixationspunkte die Gesichtsbilder so ausgelegt werden, als wäre keine Raddrehung erfolgt, so werden das vor der Drehung in der Ebene $x = 0$ gezogene Strahlenbündel und das auf dem Kegel der Gleichung 2) gelegene nicht unterschieden werden, und das Strahlenbündel wird also eben oder kegelförmig erscheinen, je nachdem in der ersten oder zweiten Stellung der Augen die Netzhauthorizonte mit der Visierebene zusammenfallen.

Dabei ist noch zu bemerken, daß diejenigen Kanten des Kegels, welche den Blicklinien sehr nahe kommen und also gegen die Augen des Beobachters selbst hingerichtet erscheinen müßten, ein zu kühnes und unwahrscheinliches Relief geben und deshalb besser vermieden werden. Außerdem ist zu bemerken, daß diejenigen Kanten der Kegelfläche, die zwischen den Augen durchgehen, in den Bildern beider Netzhäute gerade entgegengesetzte Richtung bekommen, und deshalb von ihnen abzusehen ist.

Um die scheinbare Lage von Kreisen zu berechnen, deren Mittelpunkt fixiert wird und deren Ebene senkrecht zur Halbierungslinie des Konvergenzwinkels ist, benutzen wir den Satz, daß, wenn die Gleichung einer Ebene in der Normalform gegeben ist,

$$U = ax + by + cz + d$$

und

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

der Ausdruck U den Abstand des Punktes (z, y, z) von der Ebene $U = 0$ bezeichnet, wobei d den Abstand des Mittelpunkts der Koordinaten von derselben Ebene anzeigt.

Bringen wir die Gleichung 1b) auf die Form

$$x\sin\gamma\sin\alpha - y\cos\gamma\sin\alpha + z\cos\alpha = U \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3),$$

nehmen wir dazu eine zweite Ebene, die auch durch die Blicklinie geht, in der aber der Winkel α um einen Rechten gewachsen ist und die deshalb auf 3) senkrecht steht,

$$x\sin\gamma\cos\alpha - y\cos\gamma\cos\alpha - z\sin\alpha = V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3a),$$

und endlich eine dritte Ebene, die auf der Blicklinie senkrecht steht,

$$x\cos\gamma + y\sin\gamma - r = W \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3b),$$

so sind U, V, W rechtwinkelige Koordinaten des Punktes (x, y, z) bezogen auf das System dieser drei Ebenen und

$$\frac{1}{m^2} U^2 + \frac{1}{n^2} V^2 = W^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3c)$$

ist die Gleichung eines Kegels zweiten Grades, der seine Spitze im Mittelpunkte des rechten Auges hat und dessen drei Hauptachsen in den Schnittlinien der Ebenen

$$U = 0, \qquad V = 0, \qquad W = 0$$

liegen.

Die Schnittlinie des Kegels 3c) mit der Ebene, $x = 0$, ist gegeben durch die Gleichung

$$y^2 \cos^2\gamma \left\{\frac{\sin^2\alpha}{m^2} + \frac{\cos^2\alpha}{n^2}\right\} + z^2 \left\{\frac{\cos^2\alpha}{m^2} + \frac{\sin^2\alpha}{n^2}\right\}$$
$$+ 2yz \cos\gamma \cos\alpha \sin\alpha \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$
$$= y^2 \sin^2\gamma - 2ry \sin\gamma + r^2.$$

Wenn wir nun verlangen, daß bei derjenigen Raddrehung des Auges, wo $\alpha = 0$, diese Schnittlinie ein Kreis sei, muß sein

$$\frac{\cos^2\gamma}{n^2} - \sin^2\gamma = \frac{1}{m^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3d).$$

Für symmetrische Stellungen des anderen Auges muß gleichzeitig γ und α negativ genommen werden. Setzen wir also

$$\begin{aligned} x \sin\gamma \sin\alpha - y \cos\gamma \sin\alpha + z \cos\alpha &= U' \\ -x \sin\gamma \cos\alpha - y \cos\gamma \cos\alpha + z \sin\alpha &= V' \\ x \cos\gamma - y \sin\gamma - r &= W', \end{aligned}$$

so ist

$$\frac{1}{m^2} U'^2 + \frac{1}{n^2} V'^2 = W'^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3e)$$

die Gleichung eines entsprechenden Kegels, dessen Achse die Blicklinie des zweiten Auges ist, dessen Spitze im Mittelpunkte dieses Auges liegt, und der, wenn $\alpha = 0$ gemacht wird, die Ebene $x = 0$ und die ihr parallelen Ebenen ebenfalls in einem Kreise schneidet, wie der Kegel 3c).

Ist nun die Stellung der Augen $\alpha = 0$ eine mit Raddrehung verbundene Stellung derselben, und die Schnittlinie der beiden Kegel ein objektiv vorhandener Kreis, so wird das Netzhautbild nach den oben gegebenen Regeln so gedeutet, als wären dieselben Netzhautbilder ohne Raddrehung erhalten worden. Das scheinbar vorhandene Objekt muß also eine Schnittlinie der Kegel 3c) und 3e) sein. Wenn wir deren Gleichungen voneinander subtrahieren, so bleiben nur diejenigen Glieder stehen, welche in beiden verschiedenes Vorzeichen haben, diese sind:

$$-\frac{1}{m^2} y \cos\gamma \sin\alpha (x \sin\gamma \sin\alpha + z \cos\alpha)$$
$$-\frac{1}{n^2} y \cos\gamma \cos\alpha (x \sin\gamma \cos\alpha - z \sin\alpha)$$
$$= y \sin\gamma (x \cos\gamma - r).$$

Diese Gleichung wird erfüllt, wenn entweder

$$y = 0$$

oder

$$x \sin\gamma \cos\gamma \left[\frac{\sin^2\alpha}{m^2} + \frac{\cos^2\alpha}{n^2} + 1\right] + z \cos\gamma \cos\alpha \sin\alpha \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right] = r \sin\gamma .$$

Die erste Schnittlinie läge also in der Medianebene, und wird sich nicht leicht als Objekt darstellen, die Ebene der zweiten wird mit Berücksichtigung der Gleichung 3d)

$$x(1 - \sin^2\alpha \sin^2\gamma) - z \sin\gamma \sin\alpha \cos\alpha = \frac{r n^2}{(n^2 + 1)\cos\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad 3\mathrm{f}.$$

Für den Fall, daß $\alpha = 0$, wird diese Gleichung

$$x = \frac{r n^2}{(n^2 + 1)\cos\gamma} = x_0 .$$

Die Schnittlinie der beiden Kegel liegt also in diesem Falle in der Entfernung x_0 vor der Ebene, $x = 0$, in einer dieser parallelen Ebene, und ist ein Kreis. Wenn α nicht gleich Null ist, ist die Ebene der Schnittlinie geneigt gegen die Ebene $x = 0$ um einen Winkel η, dessen Tangente ist

$$\operatorname{tang}\eta = \frac{\sin\gamma \sin\alpha \cos\alpha}{1 - \sin^2\gamma \sin^2\alpha}$$

und sie schneidet die Visierebene $z = 0$ in der Linie

$$x = \frac{x_0}{1 - \sin^2\alpha \sin^2\gamma},$$

also etwas entfernter vom Auge als vorher. Die Schnittlinie ist in diesem Falle eine Ellipse.

Die nahehin vertikalen Achsenebenen der beiden Kegel

$$V = 0 \quad \text{und} \quad V' = 0$$

schneiden sich in der geraden Linie, deren Gleichungen sind

$$\left.\begin{array}{l} x \sin\gamma = y \operatorname{tang}\alpha \\ y = 0 \end{array}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4.$$

für $\alpha = 0$ werden die Gleichungen dieser Linie

$$x = 0, \qquad z = 0.$$

Eine zur Visierebene senkrechte Linie erscheint also bei der Raddrehung α beider Augen gegen die Ebene $x = 0$ geneigt unter dem Winkel η', dessen Tangente ist

$$\operatorname{tang}\eta_1 = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha \cdot \sin\gamma}.$$

Wenn nun die Winkel α und γ, wie dies bei den praktisch ausführbaren Versuchen immer der Fall sein wird, klein sind, so ist

$$\operatorname{tang}\eta' > \operatorname{tang}\eta .$$

Der senkrechte Durchmesser des Kreises erscheint also stärker gegen die Ebene $x = 0$ geneigt als die Ebene des Kreises, und daher scheint er sich vom Kreise zu lösen, wie dies Recklinghausen beobachtet hat. Da gerade die horizontal verlaufenden Teile der Kreislinie nur eine sehr unbestimmte binokulare Lokalisation geben, so kann der Kreis auch verbogen erscheinen, wo der Durchmesser ihn schneidet, ohne sich von ihm zu lösen.

Betrachtet man nicht einen Kreis, sondern Ellipsen, so findet die Gleichung (3d) nicht statt, und man findet, daß Ellipsen mit längerer vertikaler Achse sich im Sinne einer vertikalen Linie neigen müssen, dieser desto näher kommend, je schmaler sie sind. Ellipsen dagegen mit längerer horizontaler Achse neigen sich entgegengesetzt, auch um so stärker, je schmaler sie sind.

Abänderung des Linsenstereoskops von Helmholtz. Da die Entfernung entsprechender Punkte in den gewöhnlichen photographischen Stereoskopenbildern nicht immer gleich der der Augen ist, sie zuweilen auch verschiedene Höhe über der Grundlinie haben, so muß man, um eine möglichst natürliche Projektion der Objekte zu erreichen, das Instrument jedem Bilde adaptieren können. In einem Stereoskop, was ich von Herrn Oertling in Berlin erhalten hatte, war dies in einfachster Weise dadurch erreicht, daß zwei prismatische Linsen in zwei zylindrischen, drehbaren Röhren saßen. Je nachdem man den brechenden Winkel der Prismen mehr nach einwärts oder nach auswärts stellte, konnte man eine größere oder geringere Konvergenz der Augen hervorbringen und auch Höhenunterschiede korrigieren. In anderer Weise, wobei die Einstellung leichter wird und die Unregelmäßigkeiten der Brechung in prismatischen Gläsern möglichst klein bleiben, habe ich denselben Zweck erreicht in dem in Fig. 58 perspektivisch und in Fig. 59 (S. 291) im Querschnitt in $^2/_5$ der natürlichen Größe dargestellten Instrumente.

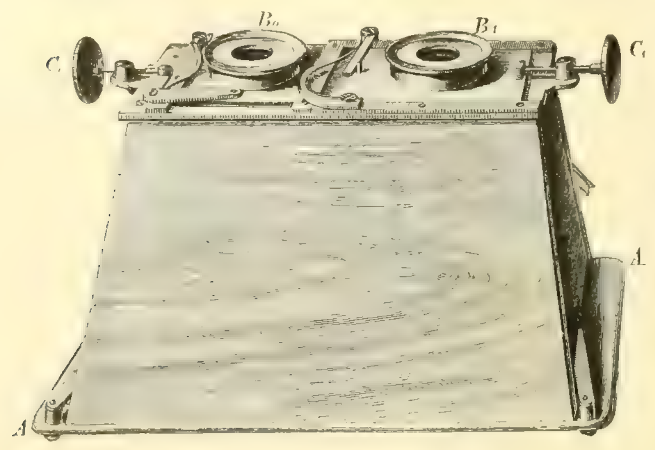


Fig. 58.

Der Zweck desselben ist namentlich auch stärkere Vergrößerungen anwenden zu können, als die gewöhnlichen Stereoskope geben, wobei man einen dem natürlichen noch mehr entsprechenden Eindruck erreicht. Doch ist zu bemerken, daß fast nur Photographien auf Glas eine solche stärkere Vergrößerung ertragen. Der Kasten ist ähnlich dem des Stereoskops von Brewster mit prismatischen Linsen eingerichtet; durch die Schlitze parallel der Bodenplatte AA, welche selbst größtenteils durch eine mattgeschliffene Glasplatte gebildet ist, wird das Bild eingeschoben. Der Beschauer blickt durch die beiden zylindrischen Röhren $B_0 B_1$, welche nur zentrierte Konvexlinsen, nicht Prismen[1], enthalten, darauf hin. Beide Röhren enthalten zunächst dem Auge eine Linse von 12 cm Brennweite und gegen ihr unteres Ende hin eine solche von 18 cm Brennweite. Die letztere kann ausgeschraubt werden, wenn man nur die gewöhnliche Vergrößerung der Stereoskope zu haben wünscht, bei welcher aber die Bilder (Landschaften) meist kleiner erscheinen, als das wirkliche Objekt dem unbewaffneten Auge von dem betreffenden Standpunkte aus erscheinen würde. Jede der Röhren B_0 und B_1 sitzt in einem zwischen Schienen verschiebbaren rechtwinkligen Schlitten, so daß B_0 in der Richtung von oben nach unten (bzw. zum Beobachter), B_1 dagegen von rechts nach links verstellt werden kann durch Drehung der Schrauben C_0 und C_1. In Fig. 58 ist dargestellt, wie die Schrauben auf die Schlitten wirken, C_1 unmittelbar, C_0 mittels eines Winkelhebels.

[1] Auch Herr Claudet hat bemerkt (*Proc. Royal Soc.* VIII, 104—110), daß es richtiger ist und natürlichere Bilder gibt, wenn man Landschaftsbilder durch Linsen mit parallelen Gesichtslinien kombiniert.

Ich pflege die Röhren erst so weit herauszuziehen, bis das photographische Bild im Brennpunkte der Konvexlinsen steht, was sich leicht erkennen läßt, wenn man von unten auf die matte Glasplatte blickt und das Bild entfernter heller Objekte auf der Fläche der stereoskopischen Darstellung auffängt. Ist der Beschauer kurzsichtig, so lasse ich ihn lieber durch die ihm gewöhnte Brille hineinsehen. Dadurch daß man das Bild in den Brennpunkt der Linsen bringt, hat man den Vorteil, daß es erstens auch bei Bewegungen des Kopfes vor den Gläsern wie ein unendlich entferntes Objekt erscheint; zweitens daß die Deckung der Bilder auch nicht gestört wird, wenn der Beobachter den Kopf nach der Seite neigt. Namentlich also, wenn man das Stereoskop fest aufstellt und den Beschauer davor treten läßt, um hindurchzusehen, so erhält er, was die Formen betrifft, in allen Beziehungen denselben optischen Eindruck, als blickte er nach den entfernten reellen Objekten. Die Schrauben C_0 und C_1 werden dann gebraucht, um den Stand der beiden optischen Bilder zu korrigieren. Indem ich meine Augen etwas konvergieren lasse, erzeuge ich Doppelbilder von irgend einem hell hervortretenden Objekte, und sehe zu, ob diese gleich hoch nebeneinander stehen; wenn nicht, so korrigiere ich mit der Schraube C_0 so lange, bis dies der Fall ist. Die Einstellung in den Brennpunkt kann man dann noch genauer kontrollieren, wenn man seitliche Neigungen des Kopfes macht. Um annähernd die richtige Konvergenz hervorzubringen, gehe ich mit dem Kopfe etwas zurück von den Gläsern, blicke über das Stereoskop fort nach wirklichen Gegenständen und vergleiche deren Entfernung mit der scheinbaren der Objekte im Stereoskop. Danach läßt sich dann mittels der Schraube C_1 leicht die nötige Korrektion machen.

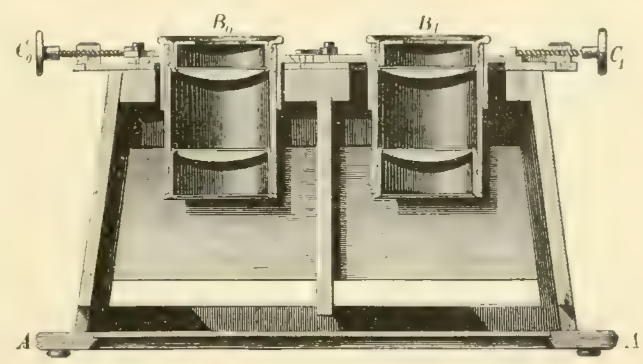


Fig. 59.

Die Objekte erscheinen durch ein solches Instrument gesehen bei richtiger Einstellung nicht nur viel größer und viel entfernter, sondern auch körperlicher als durch die gewöhnlichen Instrumente, welche fast immer zu starke Konvergenz verlangen und deshalb die Gegenstände als Basreliefs erscheinen lassen. Man hat auch den sehr wesentlichen Vorteil, daß man die sonst so leicht eintretende Ermüdung und Schmerzhaftigkeit der Augen hierbei gänzlich vermeiden kann.

Außer dem schon genannten Spiegelstereoskop von Wheatstone, dem Linsenstereoskop von Brewster in seinen verschiedenen Modifikationen, dem Pseudoskop, welches auch gebraucht werden kann, um je zwei Zeichnungen miteinander zur Deckung zu bringen, können auch stereoskopische Wirkungen mit nur einer Zeichnung und einem Prisma erzeugt werden.[1] Wenn die Zeichnung nämlich einen zur Medianebene des Beschauers symmetrisch gebildeten Gegenstand darstellt, so wie er vom rechten Auge gesehen wird, so würde die entsprechende Ansicht des linken Auges ihr symmetrisch oder ihrem Spiegelbilde kongruent sein. Statt der zweiten Zeichnung kann man also auch wirklich ein Spiegelbild der ersten setzen, indem man mit dem linken Auge durch ein rechtwinkliges Glasprisma parallel dessen Hypotenusenfläche hindurchsieht, wobei, wie mehrfach schon erwähnt ist, der Beschauer ein in der Hypotenusenfläche durch totale Reflexion entworfenes Spiegelbild des Objektes sieht. Das rechte Auge blickt inzwischen direkt nach der Zeichnung. Wenn man die Bilder beider Augen zum Decken bringt, sieht man das körperliche Relief. Nimmt man

[1] Dove, Pogg. Ann. LXXXIII. 183. Berliner Monatsberichte. 1850. p. 152. Brewster, *Phil. Mag.* (4) III. 16—26. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2. p. 5.

das Prisma vor das linke Auge, so sieht man das umgekehrte Relief. Man kann auf diese Weise oft Zeichnungen zu stereoskopischen Effekten benutzen, die gar nicht dazu bestimmt sind, wie zum Beispiel photographische Porträts, welche von vorn mit einer sehr kleinen Abweichung nach einer Seite hin aufgenommen worden sind.

Ähnliche stereoskopische Effekte erreichte Dove[1], indem er nach einer passenden Zeichnung mit einem astronomischen und einem Galileischen Fernrohr von gleicher Vergrößerung hinsah. Ersteres kehrt die Zeichnung um, letzteres nicht. Man kann hierzu dieselben Zeichnungen brauchen, wie für das einfache Prismenstereoskop, nur muß die obere Hälfte des dargestellten Körpers auch mit der unteren symmetrisch sein.

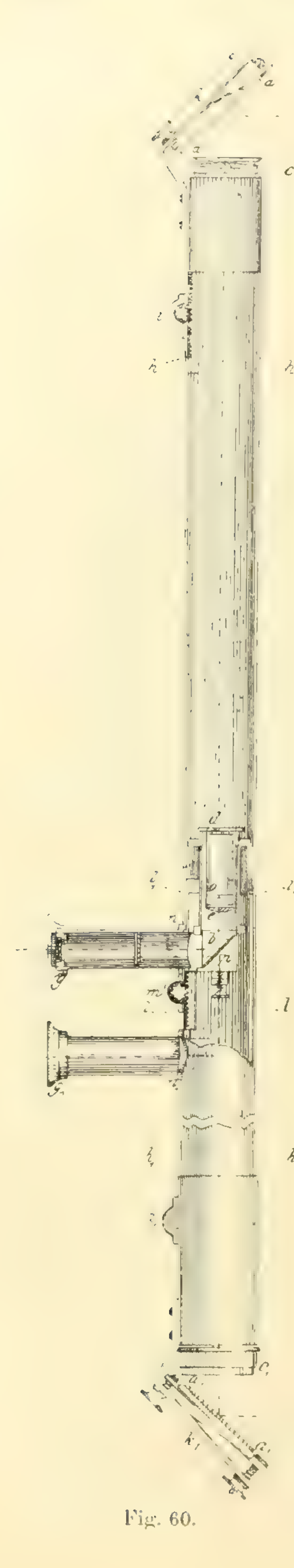


Fig. 60.

Das einfachere Telestereoskop ohne Vergrößerung habe ich oben beschrieben; ich habe ein ähnliches Instrument mit zwei Fernröhren konstruieren lassen, mit welchem man entfernte Gegenstände in ihrer körperlichen Form stereoskopisch sehen kann. Der optische Teil des Instrumentes ist dargestellt in Fig. 60. Das Licht, was von den Objekten kommt, wird zunächst aufgefangen durch die beiden ebenen Spiegel $a\,a$ und $a_1\,a_1$. Diese Spiegel müssen aber von der größten Vollendung sein, weil sie sonst bei der Vergrößerung durch die Fernröhre verzerrte Bilder geben. Durch drei Schrauben werden sie gegen die Platte k und k' angezogen, während zwischen ihnen und der Platte Federn liegen, die sie so weit entfernen, als die Schrauben es zulassen. Mittels der Schrauben kann man die Stellung der Spiegel so weit abändern, daß die Bilder beider Seiten zusammenfallen. Die Objektivlinsen der Fernröhre liegen bei c und c'. Sie sind in Röhren eingesetzt, welche mittels der gezahnten Triebe i und i', die in gezahnte Stangen h und h' eingreifen, hin und hergeschoben werden können, um die Fokaldistanz des Fernrohres regulieren zu können. Zwei Okularlinsen eines terrestrischen Okulars liegen bei d und e. Dann fällt das Licht auf das Prisma b, um in den Seitenröhren auf die dritte und vierte Okularlinse g zu fallen. Das Prisma b kann mittels der in den dahinter liegenden Metallklotz p eingreifenden Schraube verschoben werden, um die optische Achse der beiden Teile des Fernrohres in Übereinstimmung zu setzen. Endlich dient der gezahnte Trieb m dazu, die beiden Okularröhren mit den ganzen Fernröhren voneinander zu entfernen oder einander zu nähern, um sie der Augendistanz des Beobachters anzupassen.

Da die Entfernung der Spiegel an dem Instrumente 1080 mm beträgt, so ist sie 16 mal größer als die der menschlichen Augen, und die stereoskopischen Unterschiede werden also 16 mal größer als für die unbewaffneten Augen. Da die Vergrößerung auch eine 16 malige ist, so ist die Wirkung des Instrumentes die, als sähe man

[1] Pogg. Ann. LXXX, 446. Berliner Monatsberichte. 1850. p. 152.

das Objekt mit unbewaffneten Augen aus einer 16 mal kleineren Entfernung, als man es wirklich sieht.

Den entgegengesetzten Effekt von dem telestereoskopischen erhält man nach einer Bemerkung von Oppel[1], wenn man zwei einander kongruente Körper in der Entfernung der Augen voneinander, beide gleich gerichtet, aufgestellt und mit parallelen Gesichtslinien betrachtet.

Stereoskopisches Mikroskop. Ein solches nach Nachets neuerer Konstruktion ist dargestellt in Fig. 61. Bei a ist das Objektivlinsensystem. Das durchtretende Strahlenbündel trifft zunächst auf das kleine reflektierende Glasprisma bei b, die eine Hälfte des Strahlenbündels geht an diesem vorbei und durch das Rohr E zum Okular e, um in das eine Auge des Beobachters zu fallen. Die andere Hälfte des Strahlenbündels dagegen, welche in das beinahe rechtwinklige Prisma b eintritt, wird von dessen Hypotenusenfläche reflektiert und gegen das zweite Prisma c hin geworfen, um hier noch einmal reflektiert zu werden in das Rohr F hinein und zum Okular f, durch welches es in das andere Auge des Beobachters fällt. Mittels der Schraube g kann das ganze Rohr F mit dem Prisma c dem Rohre E genähert oder von ihm entfernt werden, um das Instrument dem Abstande der beiden Augen des jedesmaligen Beobachters anzupassen. Da die Lichtbündel, welche aus den Okularen e und f austreten, sehr schmal sind, so muß ihre Entfernung der der Pupillen genau gleich sein, damit beide Augen ein Bild empfangen. In den englischen Instrumenten ähnlicher Art sind beide Röhren fest verbunden, und die Akkommodation für die Augendistanz des Beobachters wird dadurch erreicht, daß man die Okularstücke der Röhren mehr oder weniger herauszieht.

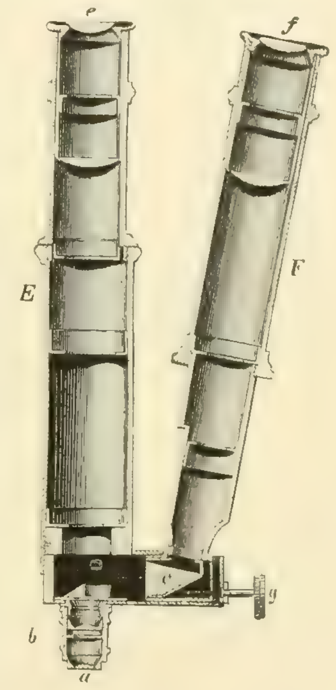


Fig. 61.

Die stereoskopische Wirkung bei diesen Instrumenten ist sehr auffallend und erleichtert die Beobachtung von Objekten verwickelterer Form außerordentlich. Sie kommt vermittels ganz anderer Umstände zustande als in den übrigen stereoskopischen Instrumenten. Wir haben in diesem Falle nämlich keine von zwei verschiedenen Standpunkten aus aufgenommenen Bilder des Objekts, da das eine Objektivlinsensystem des Mikroskops die beiden Bilder für beide Augen entwirft und nur die eine Hälfte des Lichts an das eine Auge, die andere an das andere verteilt wird. Eine stereoskopische Wirkung kommt hier nur deshalb zustande, weil allein die Punkte der Fokalebene des Mikroskops ein punktförmiges Bild geben; alle Punkte aber, die vor oder hinter der Fokalebene liegen, geben kleine Zerstreuungskreise, und wegen der Halbierung des Strahlenbündels fällt die eine Hälfte eines jeden Zerstreuungskreises in das rechte, die andere in das linke Auge. Da nun die rechte Hälfte des Zerstreuungskreises anders liegt als die linke, so kommt dadurch eine stereoskopische Wirkung zustande.

Nach den Bd. I, S. 64—67 gegebenen Regeln können die Hauptpunkte und Brennpunkte des ganzen optischen Systems eines Mikroskops leicht gefunden werden. Der erste Hauptpunkt liegt unterhalb des Objektivglases, der erste Brennpunkt ebenfalls, aber dem Objektiv näher. Der zweite Haupt- und Brennpunkt liegen oberhalb des Okulars, und zwar wieder der Brennpunkt diesem näher. Das Auge des Beobachters können wir uns im zweiten Brennpunkte befindlich denken und p die Brennweite des ganzen Systems nennen. Sind nun f und φ die Entfernungen beziehlich

[1] Jahresbericht des Frankfurter Vereins 1858—59, p. 64—75.

des Objekts vom ersten Brennpunkte nach oben und des Bildes vom zweiten Brennpunkte nach unten, so ist nach S. 57 (Bd. I.) Gleichung 7b)

$$\varphi = \frac{p^2}{f}.$$

Bezeichnet b die Größe des Objekts, β die seines Bildes, so ist

$$\frac{\beta}{b} = \frac{p-\varphi}{f-p} = \frac{p}{f} = \frac{\varphi}{p}.$$

Denken wir uns nun das Auge akkommodiert für das Bild β, und vor oder hinter dem Gegenstande b noch ein anderes Objekt b', welches, da jenes erste durchsichtig ist, mit ihm zugleich gesehen werden kann, und dessen Entfernung vom Brennpunkte f' sein mag, so ist die Entfernung seines Bildes vom Auge und vom zweiten Brennpunkte

$$\varphi' = \frac{p^2}{f'},$$

woraus folgt

$$\varphi' - \varphi = p^2 \cdot \frac{f-f'}{ff'}.$$

Der Winkel, unter dem die Strahlen vom Bilde b aus in das Objektivglas fallen, sei a, der zugehörige Divergenzwinkel der Strahlen des Bildes β sei α, so ist nach Bd. I. S. 58, Gleichung 7d) und Bd. I. S. 62, Gleichung 9)

$$b \operatorname{tang} a = \beta \operatorname{tang} \alpha$$

oder

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{f}{p} \operatorname{tang} a$$

und ebenso für die Bilder b' und β' nebst den zugehörigen Divergenzen der Strahlen a' und α' ist

$$\operatorname{tang} \alpha' = \frac{f'}{p} \operatorname{tang} a'.$$

Der Radius ϱ des Zerstreuungskreises in der Ebene des Bildes β, für welche das Auge akkommodiert ist, ist, wie leicht ersichtlich,

$$\varrho = (\varphi' - \varphi) \operatorname{tang} \alpha' = \frac{p}{f}(f - f') \operatorname{tang} a'.$$

Da nur Gegenstände beobachtet werden können, für welche der Zerstreuungskreis sehr klein ist, also $\varphi' - \varphi$ und $f' - f$ sehr klein sind, so kann die Veränderlichkeit des Winkels a' für verschiedene sichtbare Objekte und sein Unterschied vom Winkel a vernachlässigt werden, und wir können deshalb unter dieser Beschränkung die letzte Gleichung schreiben

$$\varrho = \frac{p \operatorname{tang} a}{f} \cdot (f - f').$$

Nun fällt von diesem Zerstreuungskreise bei der beschriebenen Einrichtung des stereoskopischen Mikroskopes die eine Hälfte in das rechte, die andere in das linke Auge. Dadurch wird jede zur Visierebene vertikale Linie des Bildes, sei sie nun isoliert gezogen oder Teil einer gleichmäßig gefärbten Fläche, verwandelt in einen Streifen von der Breite ϱ, so daß die Verbreiterung in dem einen Bilde nach rechts hin, im anderen nach links hin geschieht. Zwei solche Streifen haben also in den beiden Bildern eine stereoskopische Parallaxe gleich ϱ im Vergleich mit den Punkten der Fokalebene.

Ist f' kleiner als f, liegt also das Objekt weiter vom Objektivglase als diejenigen Punkte, für deren Bild das Auge akkommodiert ist, so ist φ' größer als φ.

das heißt das Bild von b' liegt unterhalb des Bildes von b, und in der Ebene von b sind die Strahlen des Bildes b' schon gekreuzt. Dann fällt die rechte Hälfte des Zerstreuungskreises in das rechte Auge des Beobachters, die linke in das linke Auge, die stereoskopische Parallaxe ist also negativ, verglichen mit der des Bildes b, und b_1 scheint, wie es wirklich liegt, hinter b zu liegen. Dabei gelangt die eine Hälfte des Zerstreuungskreises durch doppelte Spiegelung in das entsprechende Auge des Beobachters und erscheint deshalb nicht von rechts nach links verkehrt, sondern in natürlicher Lage.

Umgekehrt verhält sich alles, wenn das Objekt b' oberhalb b liegt.

In den Instrumenten von Nachet kann man den Schieber, der die Prismen enthält, so weit hervorziehen, daß das kleine Glasprisma b der Fig. 60 vor die andere (rechte) Hälfte der Öffnung tritt, dann erhält man einen pseudoskopischen Effekt: was in Wirklichkeit unten liegt, erscheint dann oben.

Ähnlich wirkt der binokulare Augenspiegel, welcher in Fig. 62 nach Nachets Konstruktion abgebildet ist. A ist ein Konkavspiegel von Glas, von dessen Mitte die Belegung weggenommen ist. Die vordere und hintere Fläche des Glases haben gleiche Krümmung, so daß es die Strahlen ungebrochen durchgehen läßt. Der Spiegel dient zur Beleuchtung des zu beobachtenden Auges. Zwischen ihm und das Auge wird eine Konvexlinse gehalten, deren reelles umgekehrtes Bild der Beobachter betrachtet, wie in dem Bd. I. S. 209, Fig. 103 schematisch dargestellten Versuche.

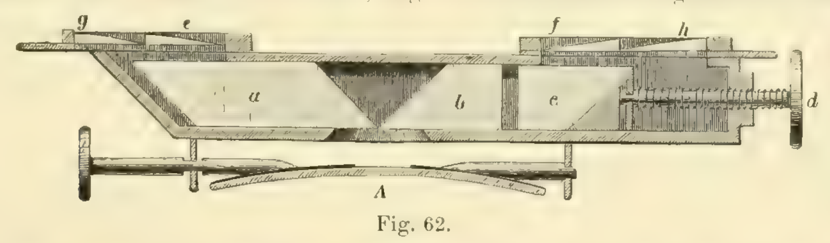


Fig. 62.

Das Licht, welches vom beobachteten Auge kommt, teilt sich hinter der Öffnung, indem es auf die beiden reflektierenden Prismen a und b fällt. Das Prisma a hat einen parallelogrammatischen Querschnitt; zwei seiner Winkel sind gleich halben Rechten. Die Prismen b und c zusammengenommen bilden ein Prisma von derselben Gestalt, wie a, welches aber quer durchschnitten ist, damit man den Teil c mittels der Schraube d dem anderen Teil b nähern und davon entfernen kann. Dadurch wird das Instrument der Augendistanz des Beobachters angepaßt. Die Strahlen, welche durch die mittlere Öffnung zuerst rechtwinklig in die vordere Fläche des Prismas a eingetreten sind, werden dann von der kleinen Seite des Parallelogramms gegen die zweite nach außen gekehrte kleine Seite reflektiert, und von dieser letzteren zum zweiten Male reflektiert gegen die Öffnung e hin, und treten durch diese aus in das eine Auge des Beobachters. Die zweite Hälfte der Strahlen, welche in das Prisma b eintreten, werden ebenso von dessen geneigter Fläche gegen die geneigte Fläche von c reflektiert und von dieser gegen die Öffnung h hin, um in das zweite Auge des Beobachters zu fallen. In die Öffnungen e und h sind schwach brechende Prismen eingesetzt, damit der Beobachter mit schwach konvergenten Blicklinien das gemeinsame Bild betrachten kann. Die Prismen sitzen in je einem Schieberchen, welches außerdem noch zwei andere Prismen mit konvexen Flächen enthält, die, wenn sie vorgeschoben werden, zugleich vergrößernd wirken.

Die vorteilhafteste Stellung der Konvexlinse, durch welche man beobachtet, ist, wenn sie ein Bild der Pupille des beobachteten Auges auf die Öffnung des Spiegels wirft, wie Bd. I. S. 209—211 erörtert ist. Unter diesen Umständen fällt das Licht, was durch die rechte Hälfte der Pupille kommt, in das links gelegene Prisma a, und das von der linken Seite der Pupille kommende in das rechts gelegene Prisma b. Das rechte Auge des Beobachters sieht also den Hintergrund des beobachteten Auges, wie er von der linken Hälfte der Pupille aus erscheint, das linke Auge, wie er von

ihrer rechten Hälfte aus erscheint. Da das Bild übrigens auch verkehrt ist, so gibt dies einen richtigen stereoskopischen Effekt, der sehr merklich und für die medizinische Beobachtung des Augenhintergrundes sehr nützlich ist.

Schließlich will ich hier noch die eigentümliche Methode der Stereoskopie von Rollmann[1] erwähnen.* Er zeichnet beide Projektionen auf dieselbe schwarze Tafel, die eine mit roten Linien, die andere mit blauen. Dann nimmt er vor das eine Auge ein rotes Glas, vor das andere ein blaues und sieht nun mit jenem nur die roten Linien, mit diesem nur die blauen, die sich dann zum Relief verbinden lassen. Wenn man blaue und rote Gläser verteilt, kann man eine solche Zeichnung vielen Personen zu gleicher Zeit zeigen. Herr J. C. d'Almeida entwirft die betreffenden Bilder mittels zweier Linsen, vor deren eine ein rotes, vor die andere ein grünes Glas eingeschaltet ist, auf einen Schirm.

Es können übrigens die verschiedenartigsten brechenden und spiegelnden Apparate gebraucht werden, um die für stereoskopische Zwecke gewünschte Verschiebung der Bilder hervorzubringen, wobei bald beide, bald nur ein Bild verschoben wird. Wie Wheatstone ursprünglich zwei Planspiegel benutzt hat, so hat Brewster[2] ein ähnliches mit zwei Spiegeln, ein anderes mit einem Spiegel, das letztere entweder mit einer oder zwei Zeichnungen beschrieben. Statt der Spiegel können auch, wie Dove[3] und Brewster vorgeschlagen haben, total reflektierende Prismen, eines oder zwei, im letzteren Falle wieder je eines vor ein Auge, oder beide zum Reversionsprisma verbunden, vor ein Auge gestellt, gebraucht werden. Ebenso genügt ein schwach brechendes Prisma mit ebenen Flächen, um eines der Bilder bis zur Deckung mit dem anderen zu verschieben. E. Wilde[4] brauchte zu demselben Zweck das doppelt reflektierende Prisma einer *Camera lucida*.

Um ohne Ablenkung der Lichtstrahlen die Kombination stereoskopischer Bilder zu erzielen, schlägt Brewster vor, vor sie eine Glasplatte mit einem schwarzen Fleckchen, welches man fixiert, in passender Entfernung zu halten. Herr Faye[5] wendet einen Schirm mit zwei Löchern an, so daß jedes Auge nur die zugehörige Zeichnung sieht, Herr Elliot[6] zwei gekreuzte Röhren, durch die das rechte Auge das linke Bild sieht und umgekehrt. Zu bemerken ist, daß wegen der Schwierigkeit die passende Akkommodation herzustellen weitsichtige Beobachter leichter bei gekreuzten Gesichtslinien, kurzsichtige bei ungekreuzten kombinieren.

J. Duboscq[7] hat prismatische Linsen in ein Operngucckerstativ gesetzt und dadurch die an der Wand hängende Doppelzeichnung betrachtet, so daß man durch Näherung und Entfernung die Konvergenz der Augenachsen verändern kann, wodurch das Relief vergrößert oder verkleinert wird. — Um beliebig große Bilder zu kombinieren, stellt er in seinem Panoramenstereoskop die Bilder übereinander und zwei, um eine horizontale Achse drehbaren, nebeneinander stehenden Spiegeln gegenüber. Der Beobachter blickt zwischen den Bildern oder unter ihnen hindurch nach den Spiegeln, die so gestellt sind, daß die entsprechenden Teile der Bilder sich decken. Die Bilder können beliebig breit gemacht werden und vor den Augen des Beobachters vorbeigleiten. Eine andere Form zur Kombination großer Bilder, die dem Stereoskop von Brewster ähnlicher ist, mit achromatischen ebenflächigen Prismen und davon

[1] Pogg. Ann. XC, 186—187.
[2] *Phil. Magaz.* (4) III, 16—26.
[3] Pogg. Ann. LXXXVIII, 183.
[4] Pogg. Ann. LXXXV, 63—67.
[5] *Comptes rendus.* XLIII, 673—674. Pogg. Ann. XCIX, 641—642.
[6] *Phil. Mag.* (4) XIII, 78.
[7] *Cosmos* I, 97—104; 703—705.

---

* Über neue Ausbildungen dieses Verfahrens vgl. Anm. 10 am Schluß des Paragraphen. K.

getrennten Linsen, beide verschiebbar, um Korrektionen des Bildes auszuführen, hat Herr Duboscq später beschrieben.[1]

In das Panoramenstereoskop können statt der Bilder nun auch rotierende stroboskopische Scheiben eingesetzt werden, so daß man die bewegten Figuren auch körperlich sieht. Diese Einrichtung gibt das Stereophantaskop oder Bioskop. Ein Instrument, was dasselbe Resultat gibt, hat Herr Czermak[2] unter dem Namen Stereophoroskop beschrieben. Er wählte dazu das gewöhnliche Linsenstereoskop, für welches beide Bilder auf einen und denselben Pappstreifen nebeneinander geklebt werden. Diese Pappstreifen mit ihren je zwei Bildern wurden an den Seitenflächen eines mehrseitigen um eine horizontale Achse drehbaren Prisma befestigt. Um das Prisma herum in der Entfernung von einigen Zollen von den Bildern läuft noch ein Gürtel von Pappdeckelstücken, in welche die nötigen Öffnungen eingeschnitten sind, um in den richtigen Momenten die Zeichnungen zu sehen. Außerhalb dieses Gürtels wird die Prismenkombination eines Brewsterschen Stereoskops festgestellt, so daß der Beobachter durch sie und durch die vorbeipassierenden Spalten nach den Bildern hinsehen kann.

Herr C. Clarke[3] hat das Brewstersche Stereoskop mit einem Fuße versehen, Herr Kilbarn[4] es zum Zusammenlegen eingerichtet. Smith und Beck[5] haben einen Fuß, eine festere Bahn für die Bilder, reichlichere Beleuchtung von allen Seiten, achromatische Linsen angebracht, Samuel[6] eine Vorrichtung, um die Entfernung der Bilder von den Linsen der Sehweite des Beobachters anzupassen.

Eigentümlich ist die Einrichtung von Claudets Stereomonoskop[7]. Er bemerkte, daß die Bilder einer *Camera obscura*, auf einer mattgeschliffenen Glasplatte entworfen und binokular betrachtet, etwas stereoskopisches Relief zeigen. Die Erscheinung erklärt sich dadurch, daß jedes Auge auf der matten Glasplatte diejenigen Strahlen am stärksten sieht, welche in Richtung seiner eigenen Gesichtslinie auffallen. Er konstruierte darauf das Stereomonoskop, welches mittels zweier Linsen zwei zusammengehörige stereoskopische Bilder auf dieselbe Stelle einer matten Glasfläche entwirft. Wenn die Glasplatte binokular betrachtet wird, sieht jedes Auge nur das für dasselbe bestimmte Bild, und es entsteht der Eindruck des Reliefs.

Um Veränderungen in der Stellung der Bilder für Untersuchungen über den optischen Effekt solcher Verschiebungen vornehmen zu können, hat Wheatstone[8] an seinem oben beschriebenen Spiegelstereoskope die parallelen Wände, an denen die Bilder aufgestellt sind, auf Schlitten verschiebbar gemacht; außerdem sind die beiden Arme des Stereoskops drehbar um eine feste Achse zwischen den beiden Spiegeln, so daß man den Konvergenzwinkel der Augen verändern kann. Herr Hardie[9] hat zu ähnlichem Zwecke, um pseudoskopische Reliefs hervorzubringen, ein dem später von mir konstruierten und oben beschriebenen Telestereoskope ähnliches Instrument mit zwei Spiegelpaaren konstruiert. Man kann damit die Bilder bald verkehrt, bald in ihrer wahren Lage zeigen, das Relief übertreiben, schwächen oder umkehren. Herr H. Meyer[10] hat zu demselben Zwecke die Bilder des Wheatstoneschen Spiegelstereoskops nach ihrer Fläche verschiebbar gemacht, und eine Skale zur Messung der Verschiebungen hinzugefügt. Doch hat die von Wheatstone vorgeschlagene Einrichtung, wo sich die Bilder im Kreise bewegen und ihr Abstand von den Augen ganz

---

[1] *Comptes rendus.* XLIV, 148—150.

[2] Wiener Berichte. XV, S. 463—466. Ein anderes ähnliches Instrument *Stereotrope* von Shaw in *Proc. Royal Soc.* XI, 70—73.

[3] *Cosmos.* III, 123.

[4] *Cosmos.* III, 770.

[5] *Athenaeum.* 1858, II, 269—260. *London J. of Arts.* Juni 1860.

[6] *Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2. p. 19.

[7] *Proc. Royal Soc.* IX, 194—196.

[8] *Phil. Transact.* 1852. p. 1—17.

[9] *Phil. Mag.* (4) V, 442—446.

[10] Pogg. Ann. LXXXV, 198—207.

unverändert gelassen werden kann, wohl den Vorteil, daß sie bei Seitenverschiebungen der Bilder die Netzhautbilder derselben ganz unverändert läßt, während bei MEYERS Einrichtung kleine Korrektionen wegen der Veränderlichkeit des Abstandes der Bilder von den Augen bei Verschiebungen längs einer ebenen Fläche berechnet werden müssen.

Ähnliche Veränderungen[1] der Konvergenz bei der Betrachtung wirklicher Körper hat ROLLET erreicht, indem er vor jedes Auge schräg gerichtet eine planparallele dicke Glasplatte stellte. Je nachdem deren vordere Flächen der Nasenseite oder der Schläfenseite des betreffenden Auges zugekehrt sind, machen sie die Blicklinien divergenter oder konvergenter. Die Erscheinungen waren dabei den Erfahrungen von WHEATSTONE entsprechend.

Stereoskopenbilder sind teils durch perspektivische Konstruktion der betreffenden Zeichnungen verfertigt und durch Lithographie oder Kupferstich vervielfältigt worden[2], teils durch Photographie. Unter den ersteren sind nur die nicht schattierten Linienzeichnungen geometrischer Gestalten, regelmäßiger Körper oder Kristallmodelle von guter Wirkung. Sie sind gleichzeitig die evidentesten Beispiele von stereoskopischen Wirkungen, da hier alle Mittel der Beleuchtung und Schattierung fehlen, welche die Täuschung unterstützen könnten. Zu ihrer Konstruktion gehört aber eine außerordentliche Genauigkeit, wenn sie nicht verzerrt aussehen sollen, da schon die allerkleinsten Abweichungen sehr merkliche Veränderungen des Reliefs nach sich ziehen können. Es können ganz außerordentlich verwickelte geometrische Gestalten durch dieses Mittel zu einer klaren körperlichen Anschauung gebracht werden. Da übrigens dergleichen Zeichnungen überall käuflich zu haben sind, so gebe ich hier keine Beispiele derselben. Die bisherigen Versuche, dergleichen lithographierte Figuren auch zu schattieren, sind ziemlich mißlungen, weil die Abstufungen des Schattens in den beiden entsprechenden Figuren nicht gleichmäßig genug gemacht werden können. Der Hilfsapparat von ROOD zur Konstruktion solcher Zeichnungen ist schon oben S. 277 erwähnt worden.

Weit vollkommener ist die Wirkung der stereoskopischen Photographien, die zuerst von Professor MOSER in Königsberg gemacht wurden, deren Anfertigung schon einen ausgedehnten Industriezweig bildet, und in denen wir Landschaften und Gebäude aller Teile der Erde, Statuen, Tiere, Blumen usw. dargestellt finden. Dieselben wurden früher meist so gemacht, daß man mit derselben *Camera obscura* nacheinander Ansichten des Objekts von zwei verschiedenen Punkten aufnahm. Das hatte aber den Nachteil, daß bei heller Sonnenbeleuchtung die Schlagschatten während der Zeit zwischen der ersten und zweiten Aufnahme ihren Ort wechselten und dann einen falschen Effekt in dem Bilde machten. Diese Schatten erscheinen dann mitunter wie körperliche in der Luft befindliche dunkle Schirme. Ich fand einen solchen Effekt an einem Bilde von Paris, wo durch die Stellung des Zeigers an der Uhr eines Kirchturms konstatiert werden konnte, daß nur fünf Minuten zwischen der Aufnahme der beiden Bilder vergangen waren. Dazu kommt die Schwierigkeit der zwei zu präparierenden lichtempfindlichen Platten usw. In neuerer Zeit werden deshalb nach D. BREWSTERS[3] Vorschlag vielfach Instrumente mit zwei Objektivgläsern benutzt, welche auf zwei verschiedenen Abschnitten derselben Platte gleich die beiden Bilder geben. Die Centra der beiden Objektivlinsen haben den Abstand der menschlichen Augen voneinander, oder auch wohl einen etwas größeren 70 bis 75 Millimeter und die *Camera obscura* selbst bildet also gleichsam ein umgekehrtes Stereoskop. Diese Instrumente sind sehr zweckmäßig zur Aufnahme naher Gegenstände und sie geben unmittelbar die Ansicht, wie sie ein am Orte des Instruments ruhig weilender Beobachter von dem Objekte gehabt haben würde. Sie haben namentlich den Vorteil, daß

[1] Wiener Sitzungsber. XLII, 488—502.

[2] Herr HESSEMER hat sehr gute der Art herausgegeben und die Regeln der Konstruktion besprochen in DINGLERS polytechn. Journal. LXXXIX, 111—121.

[3] *Phil. Mag.* (4) III, 26—30; 1852. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2. p. 5.

man bei scharfer Sonnenbeleuchtung durch instantane Exposition der Platte gute Bilder von beweglichen Objekten, Menschen, Tieren, Schiffen, ja selbst prachtvolle Bilder der Wellen einer bewegten Wasseroberfläche erzielen kann. Aber sie genügen eigentlich nicht für Landschaften mit weit entfernten Objekten, weil die Distanz der Gesichtspunkte zu klein ist, um in diesen hinreichend große Unterschiede zu erhalten, und die ferneren Teile der Landschaft deshalb gewöhnlich ganz flach aussehen.[1] Für diese ist es besser, eine Art telestereoskopischer Wirkung zu erzielen, dadurch daß man zwei Aufnahmen von zwei entfernteren Punkten macht. So habe ich zum Beispiel unter den sehr vollendeten photographischen Landschaften von Braun in Dornach Abbildungen des Wetterhorns von je zwei verschiedenen Punkten von Grindelwald aus gefunden, zwei desselben Berges von zwei verschiedenen Punkten der Bachalp aus, ebenso der Jungfrau von Mürren aus, welche eine ausgezeichnete schöne Modellierung der Bergform geben, wenn man die ursprünglichen Bilderpaare auseinander schneidet und je zwei aus verschiedenen Paaren kombiniert, die also größerer Distanz der Gesichtspunkte entsprechen, als wenn man die zusammengehörigen kombiniert. Im letzteren Falle erkennt man die körperliche Form der Berge ebensowenig, wie ein stillsitzender Beobachter; im ersteren erkennt man sie besser, ähnlich einem Beobachter, der hin- und hergeht und die nacheinander entstehenden Ansichten des Berges vergleicht.

Stereoskopische Abbildungen mikroskopischer Gegenstände von sehr schöner Wirkung sind von Babo[2] angefertigt worden. Bei der Aufnahme wurde die Neigung des Objekttisches gegen die Achse des Mikroskops für die beiden Bilder verschieden gemacht und so die stereoskopische Parallaxe gewonnen.

Bewegliche Bilder hat Herr J. G. Halske verfertigt. Zuerst machte er in einem Doppelbilde, einen abgestumpften Kegel darstellend, die mittleren kleinen Kreise in einer horizontalen Linie verschiebbar. Am hübschesten war aber die Erscheinung zu sehen auf einer schwarzen horizontalen kreisförmigen Scheibe von etwa drei Zoll Durchmesser, die um ihre Achse sich sehr leicht drehte und, einmal angestoßen, ziemlich lange in Bewegung blieb. Auf dieselbe wurde eine kleinere weiße Kreisscheibe (Oblate) gelegt und die Scheibe mit einem Auge durch ein passend befestigtes total reflektierendes rechtwinkliges Prisma betrachtet, mit dem anderen frei. Wenn sich der kleinere Kreis bei der Drehung rechts vom Mittelpunkt befand, sah ihn das freie Auge rechts, das durch das Prisma schauende Auge aber wegen der Spiegelung links vom Mittelpunkte, und so wurde die stereoskopische Parallaxe hergestellt. Der kleine Kreis schien durch die Fläche des großen hindurch wechselnd bald aufzusteigen, bald hinabzusinken.*

Geschichte. Die älteren Ansichten über die Tiefenwahrnehmung schlossen sich zunächst an die Frage über die scheinbar verschiedene Größe des Mondes. Ptolemaeus (150 n. Chr.) sagt schon, daß die Seele von der Größe der Gegenstände nach einer vorgefaßten Schätzung ihrer Entfernung urteilt; diese scheine größer, wenn viele Gegenstände zwischen dem Auge und der betrachteten Sache liegen, wie es der Fall ist, wenn die Himmelskörper nahe beim Horizont sind[3]. An einer anderen Stelle freilich schreibt er die Vergrößerung der Brechung der Strahlen durch die Dünste zu[4].

[1] Über die Wahl des Winkels Claudet im *Cosmos* IV, 65—67, 147 — Sutton im *Cosmos* IX, 313—319.

[2] Bericht der Freiburger Ges. II, 312—314.

[3] Montucla, *Hist. des Mathém.* Vol. I, p. 309. — Rogeri Baconis Perspect., p. 118. — Priestley, Geschichte der Optik, übersetzt von Klügel, p. 11—12. — Gregory, Geometria. Pars univers., p. 141. — Malebranche, *Recherche de la verité.* P. I. — Huygens in Smith, *Opticks.* Art. 586. — Logan in *Phil. Trans.* XXXIX, 404.

[4] Almagest, L. III, c. 3. Auch Strabo in Geogr. I, 3.

* Über einige weitere das stereoskopische Sehen, insbesondere seine Bedingungen betreffende Untersuchungen vgl. Anm. 11 am Schlusse des Paragraphen. Die große Bedeutung zu der sich die Konstruktion binokularer Instrumente neuerdings entwickelt hat, läßt eine eingehendere Behandlung dieses Gegenstandes hier wünschenswert erscheinen. Ihr ist das zweite Anhangskapitel gewidmet. K.

ALHAZEN[1] (im 10. Jahrh.) widerlegt die letztere Ansicht und kehrt zur ersteren zurück. Ihm pflichtet ROGER BACO bei, während PORTA[2] es bestreitet. VITELLIO[3] (1270) schließt sich ALHAZEN an und macht auch darauf aufmerksam, daß überhaupt das Himmelsgewölbe am Horizont scheinbar entfernter sei, als im Zenit. KEPLER[4], dem sich CARTESIUS[5] im wesentlichen anschloß, sagt über die Beurteilung der Entfernung schon, die Entfernung der beiden Augen sei die Grundlinie, deren man sich zur Messung der Entfernung der gesehenen Objekte bediene. Und weil ein Auge von beiden Augen diese Art zu messen lerne, so könne auch bei verhältnismäßig kleinen Entfernungen die Breite des Sterns im Auge als Grundlinie dienen. Dann bemerkt er weiter, daß man auch mit einem Auge die verschiedenen Grade des Lichts zu schätzen und die Größe mit der Entfernung der Sache durch die Übung zu vergleichen wisse, indem man durch die Erfahrung lerne, wie weit man die Hand danach auszustrecken und dahin zu gehen habe. Er kannte also schon die Hauptmomente dieser Beurteilung, abgesehen von der Verschiedenheit der Bilder.

GASSENDI[6] konnte indessen in bezug auf den Mond wieder behaupten, er erscheine größer in der Nähe des Horizonts, weil dann wegen des schwächeren Lichts die Pupille sich erweitere. HOBBES[7] ging auf die Erklärungen der Alten zurück und bestimmte die scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes als ein Stück einer Kugelfläche. Pater GOUYE[8], MOLYNEUX[9] und SAMUEL DUNN[10] bemerkten dagegen, daß es nicht nötig sei, Gegenstände zwischen dem Auge und dem Monde zu haben, und daß doch die Täuschung nicht (wenigstens nicht immer) aufhöre. DESAGULIERS[11] arrangierte Versuche, wobei die Zuschauer zu falschen Schlüssen über die Entfernung induziert wurden und demgemäß auch die Größe falsch beurteilten. BERKELEY[12] hob das trübe Ansehen und die Lichtschwäche des Mondes am Horizonte hervor, Umstände, die jedenfalls einen sehr deutlichen Einfluß haben. Auch SMITH[13] untersuchte den Einfluß der scheinbaren Gestalt des Himmelsgewölbes; er stellte eine Reihe Schätzungen an über scheinbar gleiche Distanzen, die bald dem Zenit, bald dem Horizont näher gelegen waren, und fand, daß die Entfernung des Horizonts scheinbar drei- bis viermal größer sei, als die des Zenits. LAMBERT[14] verglich den Querschnitt des Himmelsgewölbes mit einer Muschellinie. Auch die Gestalt und Breite des Regenbogens wird dadurch verändert, er erscheint flach elliptisch, seine Mitte schmaler als die Fußpunkte; ebenso werden Sonnenhöfe, Sterndistanzen scheinbar verändert. SMITH hat auch folgenden hübschen Versuch angegeben. Wenn man in den Brennpunkt einer Konvexlinse eine kleine kreisrunde Oblate stellt, so erscheint deren Bild, durch die Linse gesehen, immer unter demselben Gesichtswinkel, wie weit auch der Beobachter sich entferne, solange seine Ränder überhaupt noch durch die Linse sichtbar sind. Scheinbar wächst aber die Größe des Bildes außerordentlich, wenn sich der Beobachter entfernt, weil wir es nicht in unendlicher Entfernung, sondern noch hinter der Linse befindlich denken.

SMITH, der gegen BERKELEYS Einmischung der Luftperspektive polemisierte, muß

[1] ALHAZEN, L. VII, p. 53—54.
[2] De refractione, p. 24, 128.
[3] Optica, Editio RISNERI, p. 412. Basel 1572.
[4] Paralipomena, p. 62—66. 1604.
[5] Dioptr. p. 68. De homine, p. 66—71.
[6] GASSENDI, Opera. Vol. II, p. 325.
[7] ROBINS *tracts.* Vol. II, p. 241—244.
[8] *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1700, p. 11.
[9] *Philos Transact.* Vol. I, p. 221.
[10] *Philos. Transact.* Vol. LII, p. 462.
[11] *Philos Transact.* Vol. VIII, p. 130.
[12] *Essay toward a new theory of vision.* Dublin 1709, p. 30. — ROBIN, *mathemat. tracts.* II, 242.
[13] Optik, deutsche Ausg. S. 418.
[14] Beiträge. I, § 60—78.

indessen doch zugeben, daß der Mond am Horizont bald größer, bald kleiner aussieht. Auch EULER[1] schließt sich BERKELEY an.

Den Einfluß, den die scheinbare Entfernung auf die Schätzung der absoluten Größe hat, hoben auch MALEBRANCHE und BOUGUER[2] gegen VARIGNON[3] hervor. Über die Mittel, die Entfernung zu beurteilen, sprachen sich DE LA HIRE[4] und PORTERFIELD[5] ebenfalls den bisher erwähnten Ansichten entsprechend aus.

Umkehrung des Reliefs ist auch schon früh bemerkt worden und zwar zuerst bei der Betrachtung durch umkehrende Mikroskope oder Teleskope von JABLOT[6] und G. P. GMELIN[7], und wurde von RITTENHOUSE[8] auf verkehrte Beleuchtung geschoben. MUNCKE[9] hob dagegen hervor, daß sie auch bei der Betrachtung durch eine einfache Loupe eintreten kann. ABAT fügte die hübsche Beobachtung hinzu, daß, wenn man eine mit Wasser halb gefüllte Glasflasche im umgekehrten Bilde eines Hohlspiegels betrachtet, der leere Teil gefüllt, der gefüllte leer erscheint, weil man die Flüssigkeit sich immer unterhalb der Grenzfläche denkt. Die neueren Ermittelungen und Ansichten über die Umkehrung des Reliefs sind oben schon angeführt worden.

Daß die Bilder, welche beide Augen von einem körperlichen Gegenstande erhalten müßten, etwas verschieden seien, hatten EUKLID, GALEN, PORTA, AGUILONIUS[10] schon gewußt und Schwierigkeiten darin gefunden. LEONARDO DA VINCI[11] hob schon hervor, daß bei dem zweiäugigen Sehen von Körpern dadurch ein Unterschied gesetzt werde, der durch kein Gemälde nachgeahmt werden könnte. SMITH[12] blickte mit parallelen Gesichtslinien nach den beiden Schenkeln eines Zirkels, die bis zur Augendistanz geöffnet waren, und bemerkte plötzlich, wie sich beide Schenkel zu einem vereinigten, der in weite Entfernung hinauszureichen schien. Es war dies eine stereoskopische Wahrnehmung. Ähnliche Wahrnehmungen an Linealen und Fäden sind von WELLS[13] gemacht worden.

Wieviel die Verschiedenheit der Bilder beider Augen zur Unterscheidung der Tiefendimensionen beiträgt, wurde aber erst durch WHEATSTONES geistreiche Erfindung des Stereoskops nachgewiesen. Die erste Nachricht davon wurde 1833 veröffentlicht[14], die ausführliche Beschreibung der Erscheinungen und ihre Theorie 1838[15]. Nach D. BREWSTERS Angaben[16] hätte ein Mathematiker J. ELLIOTT in Edinburg es ebenfalls im Jahre 1834 erfunden und 1839 veröffentlicht. Ein Dritter, der die Erfindung in Anspruch nimmt, ist Herr G. MAYNARD[17]. Herr WHEATSTONE kann jedenfalls den Vorrang der Priorität behaupten, und ist auch sein Aufsatz von 1838, der die Beschreibung des Spiegelstereoskops enthält, voll von einer reichen Menge von Versuchen und Beobachtungen, durch welche alle wesentlichen hierher gehörigen Verhältnisse deutlich dargelegt und erwiesen werden. Später wurde im Jahre 1859 von

[1] Briefe an eine deutsche Prinzessin. S. 317.
[2] *Mém. de l'Académie.* 1755. p. 99 u. 156.
[3] Ebenda. 1717.
[4] *Mém. de Paris.* 1694.
[5] *Treatise on the eye.* 1759.
[6] *Description de plusieurs nouveaux microscopes.* 1712.
[7] *Philos. Transact.* 1747.
[8] *Transact. of the American Philos. Society.* 1786. II.
[9] GEHLERS physik. Wörterbuch, neu bearbeitet. Leipzig 1828. IV, 1455.
[10] S. BREWSTER, *the stereoscope, its history, theory and construction.* London 1856.
[11] *Trattato della pittura.*
[12] *System of Optics.* II, 388 u. 526.
[13] *Essay upon single vision with two eyes.* 1792. Zweite Aufl. 1818.
[14] In H. MAYOS *Outlines of human physiology.* p. 288.
[15] *Philosophical Transactions* 1838. P. II, 371—394.
[16] *Liverpool and Manchester Photographic Journal.* 1857, January 1, p. 4—7. — January 15, p. 21—23.
[17] TORONTO, *Royal Standard.* 1836. TORONTO, *Times.* 1857, October 8.

Dr. A. Brown[1] im Museum Wicar in Lille eine Doppelzeichnung von Jacopo Chimenti (geboren 1554, gestorben 1640) gefunden, einen Mann darstellend, der auf einem Schemel sitzt und in der einen Hand einen Zirkel, in der anderen einen Lotfaden hält. Die beiden Zeichnungen, stereoskopisch vereinigt, geben eine Art von Relief. D. Brewster glaubte annehmen zu dürfen, daß sie von Chimenti zur Prüfung der Theorie von Porta, die 1593 veröffentlicht war, ausgeführt seien. Seitdem sind photographische Abbildungen dieser Zeichnungen in den Handel gekommen. Die beiden Bilder des Mannes sind in der Tat von verschiedenen Gesichtspunkten aus aufgenommen; ich muß indessen gestehen, daß ich es für unwahrscheinlich halte, daß der Zeichner sie für einen stereoskopischen Versuch bestimmt habe, denn gerade der Sessel, der Zirkel und der Faden, welche leicht richtig zu konstruieren gewesen wären, sind als Nebendinge behandelt und so unregelmäßig und verschiedenartig gezeichnet, daß sie sich nicht vereinigen lassen. Und hätte der Zeichner die Theorie prüfen wollen, so müßte man eher erwarten, daß die leicht zu zeichnenden Dinge richtig, die schwer zu zeichnenden, wie die Gestalt des Menschen, ungenau gemacht worden wären. Es scheint mir wahrscheinlicher, daß der Zeichner, mit der ersten Figur nicht ganz zufrieden, sie noch einmal von einem etwas anderen Standpunkte aus gezeichnet, und zwar zufällig auf dasselbe Blatt.

Die jetzt gewöhnliche Form des Linsenstereoskops wurde von D. Brewster 1843 veröffentlicht. Die Übersicht der weiteren Erfindungen gibt die nachfolgende Übersicht der Literatur; die Geschichte der Theorie dieser Erscheinungen wird bei den nächsten Paragraphen folgen. Die Untersuchungen über die Fehler der reinen binokularen Lokalisation sind erst in den letzten Jahren von Recklinghausen[2], Hering[3], J. Towne und mir selbst[4] in Angriff genommen worden, bedürfen aber noch vielfach erneuerter Wiederholung und Erweiterung von anderen Beobachtern.

1. Tiefenwahrnehmung ohne Rücksicht auf die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder.

150. Claudius Ptolemaeus, Syntaxis mathematica (Almagest). Lib. III, Cap. 3 und Optica.

1038. Alhazen, Opticae thesaurus. Lib. VII, p. 53—54. Edit. Risneri. Basil. 1572.

1214—94. Roger Baco, Opus majus. London 1733. Perspective. p. 118.

1271. Vitellio, Optica. p. 412. Edit. Risneri. Basil. 1572.

1583. B. Porta, De refractione. p. 24, 128.

1588—1679. Hobbes in Robins *Mathematical tracts.* London 1761. Vol. II, p. 241—244.

1604. Kepler, Paralipomena p. 62—66.

1644. Descartes, Dioptrice. Amstelodann. p. 68. De homine. p. 66—71.

1658. P. Gassendi, Opera omnia. Lugd. 1658. Vol. II, p. 395.

1667. J. Gregory, Geometriae pars universalis. Venetiae. p. 141.

1674. Malebranche, *Recherche de la verité.* Paris. P. I.

1687. Molyneux, *Why celestial objects appear greatest near the horizon. Phil. Trans.* 1681. Vol. I, p. 221.

1694. de la Hire, *Sur différents accidents de la vue. Anc. Mémoires de Paris.* IX.

1700. Th. Gouye, *Mém. de Paris.* 1700. p. 11.

1709. Berkeley, *Essay toward a new theory of vision.* Dublin. p. 30. — Auch in Robins *mathematical tracts.* II, 242. London 1761.

1712. Jablot, *Description de plusieurs noveaux microscopes.* (Umkehrung des Reliefs.)

1717. Varignon, *Lignes suivant lesquelles des arbres doivent être plantés pour être vues deux à deux aux extrémités de chaque ordonnée à ces lignes sous des angles de sinus doneés. Mém. de Paris.* 1717.

1728. R. Smith, Optik. Deutsche Ausgabe. S. 418. Ebenda Huygens in Art. 586.

[1] *Photographic Journal.* 1860, May 15. — *Encyclop. Britann.* Artikel: Stereoskope.

[2] Netzhautfunktionen im Archiv für Ophthalmologie. V, 147—173.

[3] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864. 4. und 5. Heft.

[4] Im Archiv für Ophthalmologie. X, 1, S. 27—40.

1736. J. Logan, *Some thoughts on the sun and the moon. when near the horizon appearing larger than when near the zenith. Phil. Trans.* 1736.
— J. T. Desaguliers, *Attempt to explain the phenomenon of the horizontal moon appearing larger than when elevated, supported by an experiment. Phil. Trans.* 1736. LII, p. 462.
1745. P. F. Gmelin, De fallaci visione per microscopia composita notata. *Phil. Trans.* 1745.
1755. P. Bouguer, *Sur la grandeur apparente des objets. Mém. de Paris.* 1755.
1758. J. E. Montucla, *Histoire des mathématiques.* Paris 1758. Vol. I, p. 309.
1759. W. Porterfield, *A treatise on the eye.* Edinb. 2 Vol.
1762. Sam. Dunn, *An attempt to assign the cause, why the sun and moon appear to the naked eye larger, when they are near the horizon. Phil. Trans.* 1762. Vol. VIII, p. 130.
1765. J. H. Lambert, Beiträge zum Gebrauch der Mathematik und deren Anwendung. Berlin 1765—72. Bd. I, § 60—78.
1768. L. Euler, *Lettres à une Princesse d'Allemagne.* Petersb. 1768—72. Deutsch von F. Kries. Leipzig 1792—94. S. 317.
1772. Priestley, Geschichte der Optik, deutsch von Klügel. Leipzig 1776. II, 491—511.
1786. D. Rittenhouse, *Explantation of an optical deception. Transact. American Philos. Society.* 1786. II. — *Edinb. Journal of science.* VII, 99.
1828. Muncke. Art. Gesicht in Gehlers physik. Wörterbuch; neu bearbeitet. Leipzig 1828. IV, 1455.
1847. D. Brewster, *On the conversion of relief by inverted vision. Edinb. Phil. Trans.* XV, 657; *Phil. Mag.* XXX, 432; *Athenaeum.* 1847, Nr. 1029, p. 773.
1848. Waller, *Sur un cas, où la vue altérée faisait voir les objets plus petits que nature. Inst.* XVII, Nr. 787, p. 39.
1850. De Haldat, *Mémoire sur quelques illusions d'optique et particulièrement sur la modification des images oculaires. C. R.* XXXII, 357.
1853. H. Denzler, Über eine Sinnestäuschung psychologischen Ursprungs. Mitt. d. naturforsch. Ges. in Zürich. III, 216—218.
1855. J. J. Oppel, Über ein Anaglyptoskop. (Vorrichtung, vertiefte Formen erhaben zu sehen.) Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1854—55, p. 55—57; Pogg. Ann. XCIX, 466—469.
1856. A. Weber, Über die scheinbare Umkehrung des Erhabenen und Vertieften. Arch. für Ophthalm. II. 1, p 141—146.
1858. H. Schroeder, Über eine optische Inversion bei Betrachtung verkehrter, durch optische Vorrichtung entworfener physischer Bilder. Pogg. Ann. CV, 298—311.
1859. W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) VII, 279—317, über den Einfluß der Akkommodation auf die räumliche Tiefenwahrnehmung.
— L. Panum, Die scheinbare Größe der gesehenen Objekte. Archiv für Ophthalmol. V, 1, p. 1—36.
1860. D. Brewster, *On some optical illusions connected with the inversion of perspective. Athenaeum,* 1860, 1, p. 24; *Rep. of Brit. Assoc.* 1860, 2, p. 7—8.
— Sinsteden, Über ein neues pseudoskopisches Bewegungsphänomen. Pogg. Ann. CXI, 336—339. *Cosmos* XVIII, 290—292.
— Mohr, Über pseudoskopische Wahrnehmungen. Pogg. Ann. CXI, 638—642.
1862. E. Emerson, *On the perception of relief. Silliman J.* (2) XXXIV, 312—314; *Phil. Mag.* (4) XXV, 125—130.
— R. T. Lewis, *On the changes in the apparent size of the moon. Phil. Mag.* (4) XXIII, 380—382.
— T. Zeno über dasselbe. *Phil. Mag.* (4) XXIV, 390—392.
— G. Schweizer, Über eine merkwürdige optische Täuschung, die bei der Betrachtung des Mondes durch Fernröhre vorkommen kann. *Bull. de Moscou.* 1862, 1, p. 336—342. Astronom. Nachrichten. LVIII, 182—192.

2. Stereoskopie und binokulare Tiefenwahrnehmungen.

300 v. Chr. Euklides, Optice et Katoptrice.
1583. B. Porta, De refractione.
1613. Aguilonius, Opticorum Libri VI. Antwerp.

1651. Leonardo da Vinci (geboren 1452, gest. 1519), *Trattato della pittura.* Rom 1651.
1728. R. Smith, *Optics,* II, 388 und 526.
1792. W. C. Wells, *Essay upon single vision with two eyes.* London 1792. Neue Auflage. London 1818.
1811. Derselbe, *Observations and experiments on vision. Phil. Trans.* 1811.
1833. A. Mayo, *Outlines of human physiology.* p. 288.
1838. C. Wheatstone, *Contributions to the physiology of vision.* Part I. *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Trans.* 1838. P. II, p. 371—394.
1841. E. Brücke, Über die stereoskopischen Erscheinungen. Müllers Archiv. 1841, p. 459.
1842. Tourtual, Die Dimension der Tiefe. Münster.
1844. D. Brewster, *Law of visible position in single and binocular vision and on the representation of solid figures by the union of dissimilar plane pictures in the retina. Edinb. Phil. Trans.* XV. *Phil. Mag.* XXIV. 356—439.
1850. Derselbe, *Notice of a chromatic stereoscope. Edinb. J.* XLVIII, 150. *Institut* Nr. 850, p. 128. *Phil. Mag.* (4) III, 31. *Silliman J.* (2) XV, 289—290.
— Duboscq. *Description du stéréoscope de M.* Brewster *construit par lui. C. R.* XXXI, 895; *Bull. de la Soc. d'encouragement.* 1851, p. 45. Dingkers polyt. Journal. CXX, 159. *Athenaeum.* 1861, p. 1350.
— H. W. Dove, Über das Binokularsehen prismatischer Farben und eine neue stereoskopische Methode. Pogg. Ann. LXXX, 446. Berl. Monatsber. 1850, p. 152. *Arch. de Genève.* XIX, 219.
— Derselbe, Beschreibung mehrerer Prismenstereoskope und eines einfachen Spiegelstereoskops. Pogg. Ann. LXXXIII, 183. Berl. Monatsber. 1851, p. 246. *Phil. Mag.* (4) II, 29. *Inst.* Nr. 937, p. 404.
— Derselbe, Über eine bei dem Doppeltsehen einer geraden Linie wahrgenommene Erscheinung. Berl. Monatsber. 1850, p. 363. *Inst.* Nr 907, p. 128.
1852. J. Duboscq, *Nouveaux stéréoscopes. Cosmos* I, 97—104; 703—705.
— D. Brewster, *Description of several new and simple stereoscopes for exhibiting, as solids, one or more representations of them on a plane. Phil. Mag.* (4) III, 16—26. *Trans. of Scott. Soc. of arts.* 1849. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2, p. 5. *Arch. d. sc. phys.* XIX, 200—204. Dinglers polyt. J. CXXIV, 109—112. *Silliman J.* (2) XV, 140—142; 288—289.
— Derselbe, *Account of a binocular camera and of a method of obtaining drawings of full length and colossal statues. Phil. Mag.* (4) III, 26—30. *Trans. of Scott. Soc. of arts.* 1849. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2. p. 5.
— Derselbe, *Sur la vision binoculaire et le stéréoscope. Cosmos* I, 422—425. *North British Review.* 1852, May.
— E. Wilde, Über die Anwendung der Camera lucida zu einem Stereoskope. Pogg. Ann. LXXXV, 63—67.
— C. Wheatstone, *Contributions to the physiology of vision.* P. II. *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Mag.* (4) III, 149—152; 504—523. *Insi.* 1852, p. 179—180. *Arch. d. sc. phys.* XIX, 196—200.
— H. Meyer, Über die Schätzung der Größe und der Entfernung der Gesichtsobjekte aus der Konvergenz der Augenachsen. Pogg. Ann. LXXXV, 198—207. *Arch. d. sc. phys.* XX, 137—138. *Cosmos.* I, p. 47.
— Dove in Pogg. Ann. LXXXV, p. 407—408.
1853. W. Rollmann, Notiz zur Stereoskopie. Pogg. Ann. LXXXIX, 350—351.
Derselbe, Zwei neue stereoskopische Methoden. Pogg. Ann. XC, 186—187. Zeitschr. für Naturwiss. III, 97—100. Fechner Zentralblatt. 1855, p. 980—981.
— W. Hardie, *Description of a new pseudoscope. Phil. Mag.* (4) V, 442—446.
— C. Clarke, *Perfectionnements apportés au stéréoscope. Cosmos* III, 123.
— Kilburn, *Stéréoscope-écrin. Cosmos.* III, 770.
1854. J. Duboscq, *Stéréoscope cosmoramique ou optique stéréoscopique. Cosmos.* IV, 33—35.
— Claudet, *Théorie des images stéréoscopiques. Cosmos.* IV, 65—67.
— Derselbe, *Angle stéréoscopique. Cosmos.* IV, 147.
— G. Knight, *On a stereoscopie cosmoramic lens. Athenaeum.* 1854, p. 1241—1242. *Cosmos.* V, 240. *Rep. of Brit. Assoc.* 1854, 2, p. 70.

1854. Moigno, *Invention du stéréoscope par réfraction.* *Cosmos.* V, 241.

— Smee, *Sur la perspective binoculaire.* *Cosmos.* V. 512—513.

1855. J. Czermak, Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Wiener Ber. XII, 322—366; XV, 425—466; XVII, 563—576.

— F. Burckhardt, Über Binokularsehen. Verhandl. d. naturf. Ges. in Basel, I, 123—154.

— Soret, *Sur un phénomène de vision binoculaire.* *Biblioth. univ. de Genève.* Octobre 1855.

1856. W. B. Rogers, *Observations on binocular vision.* *Silliman J.* (2) XXI, 80—95; 173—189; 439. *Edinb. J.* (2) III, 210—217.

— D. Brewster on Mr. Roger's *theory of binocular vision.* *Proc. of Edinb. R. Soc.* III, 356—358.

— J. J. Oppel, Notizen über Stereoskopie, insbesondere über eine einfache vergrößernde Modifikation des Stereoskops ohne Spiegel und Gläser. Jahresber. d. Frankfurt. Vereins. 1855—1856, p. 37—56.

Faye, *Sur un nouveau système de stéréoscope.* *C. R.* XLIII, 673—674. Pogg. Ann. XCIX, 641—642. *Cosmos.* IX, 374—375. *Inst.* 1856, p. 349. *Arch. de sc. phys.* XXXIII, 221. Dinglers polyt. J. CXLIII, 316.

— Zinelli, Neue Methode, die Bilder im Relief zu sehen. Zeitschr. f. Mathematik. 1856, 1 p. 320—321. Horn photogr. J. 1856, Nr. 10. Dinglers polyt. J. CXL, 315.

— H. Goldschmidt, *Sur la vision stéréoscopique.* *Cosmos.* IX, 657.

— H. Meyer, Beitrag zur Lehre von der Schätzung der Entfernung aus der Konvergenz der Augenachsen. Archiv f. Ophthalmologie. II, 2, p. 92—94.

— J. M. Hessemer, Über die Anfertigung stereoskopischer Bilder. Dinglers polyt. J. LXXXIX, 111—121.

— Lugeol, *Stereoscopic experiment.* *Silliman J.* (2) XXII, 104.

— Sutton, *Sur la théorie du stéréoscope.* *Cosmos.* IX, 313—319.

— D. Brewster, *The stereoscope, its history, theory and construction.* London 1856.

— A. Claudet, *On varius phenomena of refraction through semilenses or prisms, producing anomalies in the illusion of stereoscopic images.* *Proc. of R. Soc.* VIII. 104—110. *Athenaeum.* 1856, p. 1029. *Cosmos.* XI, 283—285. *Inst.* 1856, p. 346, *Phil. Mag.* (4) XIII. 71—75. *Rep. of Brit. Assoc.* 1856, 2, p. 9—10.

— D. Brewster, *Réclamation de priorité.* *Cosmos.* VIII, 549—552.

— Wheatstone, *Réponse aux assertions de Sir* D. Brewster. *Cosmos.* VIII, 625—628.

1857. Dove, Über die Unterschiede monokularer und binokularer Pseudoskopie. Berl. Monatsber. 1857, p. 221—226. Pogg. Ann. CI, 302—308.

— Dove, Darstellung von Körpern durch Betrachtung einer Projektion derselben vermittels eines Prismenstereoskops. Berl. Monatsber. 1857, p. 291.

— A. Cima, *Sopra un nuovo fenomeno di stereoscopia.* *Cimento.* VI, 185—102. *C. R.* XLV, 664. *Phil. Mag.* (4) XIV, 480. Pogg. Ann. CII, 319. *Inst.* 1857, p. 364—365. *Cosmos.* XI, 353—354.

— J. G. Halske, Stereoskop mit beweglichen Bildern. Pogg. Ann. C. 657—658.

— J. Elliot, *The telescoping stereoscope.* *Phil. Mag.* (4) XIII, 78. *Silliman J.* (2) XXIII, 292.

— Derselbe, *On two new forms of the stereoscope, intended for the purpose of uniting large binocular pictures.* *Phil. Mag.* (4) XIII, 104—108; 218—219.

— H. Helmholtz, Das Telestereoskop. Pogg. Ann. CI, 494—496; CII, 167—175. Verhandl. d. naturhist. Vereins d. Rheinl. 1857. *Ann. de chimie.* (3) LII, 118—124. *Phil. Mag.* (4) XV, 19—24. *Inst.* 1858, p, 63—64. *Silliman J.* (2) XXV. 297—298. Dinglers polyt. J. CXLIV, 268—270. Polytechn. Centralbl. 1857, p. 1449—1450; 1858, p. 180—186. *Cimento.* VI, 239—240. *Cosmos.* XI, 352—353.

— J. Duboscq, *Note sur une nouvelle disposition de stéréoscope à prismes réfringents, à angle variable et lentilles mobiles.* *C. R.* XLIV, 148—150. *Cosmos.* X, 91—92.

1857. W. Crookes, *Théorie des images stéréoscopiques.* *Cosmos.* X, 461—462.

— D. Brewster and C. Wheatstone im *Liverpool and Manchester Photographic J.* 1857, January 1, p. 4—7; January 15, p. 21—23. (Prioritätsstreit.)

1858. Dove, Über den Einfluß des Binokularsehens bei Beurteilung der Entfernung durch Spiegelung und Brechung gesehener Gegenstände. Berl. Monatsber. 1858, p. 312—315. Pogg. Ann. CIV, 325—329. *Inst.* 1858, p. 282—283.

1858. W. Hardie, *On the telestereoscope. Phil. Mag.* (4) XV, 156—157. (Prioritätsreklamation.)

Smith and Beck, *Improvements to the stereoscope. Athenaeum.* 1858, II, 269—270.

A. Boblin, *Expérience d'optique permettant d'obtenir d'une seule épreuve photographique la sensation d'un corps en relief. Bull. de Brux.* (2) V, 304—306. *Inst.* 1858, p. 431—432. *C. R.* XLVII, 444.

— Claudet, *On the stereomonoscope. Phil. Mag.* (4) XVI, 462—463. *Proc. of Roy. Soc.* IX, 194—196. Dingler polyt. J. CLI, 72—73. *Cosmos.* XII, 493.

— J. C. d'Almeida, *Nouvel appareil stéréoscopique. C. R.* XLVII, 61—63.

1859. F. v. Recklinghausen, Netzhautfunktionen. Archiv für Ophthalmol. V, 2, 127—179. Pogg. Ann. CX, 65—92.

— E. Brücke, Eine Dissektionsbrille. Archiv für Ophthalmol. V, 2, p. 181—183.

— H. W. Dove, Stereoskopische Darstellung eines durch einen Doppelspat binokular betrachteten Typendrucks. Berl. Monatsber. 1859, p. 278—280. Pogg. Ann. CVI, 655—657. *Phil. Mag.* (4) XVII, 414—415.

— Derselbe, Anwendung des Stereoskops, um einen Druck von seinem Nachdruck, überhaupt ein Original von seiner Kopie zu unterscheiden. Berl. Monatsber. 1859, p. 280—288. Pogg. Ann. CVII, 657—660. *Phil. Mag.* (4) XVII, 415—417. Dinglers polyt. J. CLIII, 451—454. Polytechn. Centralbl. 1859, p. 741—744.

— J. Müller, Stereoskopische Mondphotographie. Pogg. Ann. CVII, 660. Ber. d. Freiburger Ges. II, 67. Dinglers polyt. J. CLIII. 75.

— W. de la Rue, *Report of the present state of celestial photography in England. Stereoscopic pictures of the moon. Rep. of Brit. Assoc.* 1859, 1, p. 143—145. *Cosmos.* XV, 519—521.

— Derselbe, *Stereoscopic pictures of the larger planets. Rep. of Brit. Assoc.* 1859, 1, p. 148, 149.

— J. J. Oppel, Über das Einfachsehen doppelter Bilder bei gekreuzten Augenachsen. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1858—59, p. 22—38; p. 64—75.

— Samuel, *On an early form of the lenticular stereoscope constructed for the use of schools. Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2, p. 19.

— H. W. Dove, Optische Studien, Fortsetzung der in der Farbenlehre enthaltenen. Berlin 1859. (Sammlung der bisher zitierten Aufsätze.)

— J. Beck, *On producing the idea of distance in the stereoscope. Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2, p. 7.

— E. Douliot, *Sulla percezione de' rilievi nello stereoscopio e nella natura. Cimento.* X, 342—352.

1860. P. Volpicelli, *Di uno stereoscopio diaframmatico. Cimento.* XII, 181—189.

— J. Beck, Verbesserungen an Stereoskopen. *Lond. J. of arts.* Juni 1860. Dinglers polyt. J. CLVII, 277—278.

— H. W. Dove, Über die Nicht-Identität der Größe der durch Prägen und Guß in derselben Form von verschiedenen Metallen erhaltenen Medaillen. Pogg. Ann. CX, 498—499. *Phil. Mag.* (4) XX, 327. Dinglers polyt. J. CLVII, 280—281.

— A. Rollet, Physiologische Versuche über binokulares Sehen, angestellt mit Hilfe planparalleler Glasplatten. Wiener Ber. XLII, 488—502.

— E. Brücke, Über prismatische Brillen. Wiener med. Wochenschrift. 9. Juni 1860.

— Giraud Teulon eben darüber. *C. R.* L, 382—385.

1861. W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Vierte Abhandl. Über das Sehen mit zwei Augen. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) XII, 145—262. Pogg. Ann. CXVI, 617—628. (Die zitierten Aufsätze sind gesammelt erschienen unter dem Titel: W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg 1862.)

— O. Becker und A. Rollet, Beiträge zur Lehre vom Sehen der dritten Dimension. Wiener Ber. XLIII, 2, p. 667—706.

— H. W. Dove, Über Binokularsehen und subjektive Farben. Berliner Monatsber. 1861, p. 521—522. Pogg. Ann. CXIV, 163—165.

— L. v. Babo, Über die stereoskopische Darstellung mikroskopischer Gegenstände. Ber. d. Freiburger Ges. II, 312—314.

— T. du Moncel, *Rapport sur les appareils stéréoscopiques de Mr.* Ph. Benoist. *Bull. de la Soc. d'encour.* 1861, 1, 198—201.

1862. J. Towne, *The stereoscope and stereoscopic results. Guys Hospital Reports.* 1862 und 1863, p. 103; XI, 144—180.
— E. Hering, Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861—64. 2. bis 5. Heft.
1864. Knapp, *Exposé des avantages de l'ophthalmoscope binoculaire. Ann. d'oculistique.* 1864.

Zusätze von v. Kries.

1. Die scheinbare Vergrößerung von Sonne und Mond in der Nähe des Horizontes ist auch in neuerer Zeit noch Gegenstand sehr zahlreicher Untersuchungen und Erörterungen gewesen und es ist dabei auch noch auf einiges Bemerkenswerte aus der älteren Literatur wie namentlich einen jene Frage berührenden Brief von Gauss[1] an Bessel hingewiesen worden. Als der Zeit nach 1867 angehörig mögen die hierunter aufgeführten Arbeiten Erwähnung finden.[2] Was das beigebrachte Tatsachenmaterial anlangt, so sind vor allem die bereits von Helmholtz in Angriff genommenen Spiegelversuche vielfach und in vervollkommneter Weise wiederholt worden.

Filehne betonte dabei die Wichtigkeit besonderer Vorsichtsmaßregeln, die eingehalten werden müssen, damit man den gespiegelten Mond wirklich am Himmel sehe und nicht wie sonstige Spiegelbilder in geringem Abstand vom Spiegel lokalisiere. Bei Einhaltung der in dieser Hinsicht gebotenen Bedingungen sah er, „daß Sonne, Mond und alle Sternkombinationen, gleichviel ob sie vom Horizont in die Höhe oder von der Höhe an den Horizonthimmel gespiegelt werden, dieselbe scheinbare Größe dort haben, welche sie haben würden, wenn sie dort wirklich stünden." Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch Zoth. Während aber Filehne vorzugsweise darauf hinwies, daß gerade am Horizont durch die Hintereinanderordnung der die untere Gesichtsfeldhälfte ausfüllenden Gegenstände der Eindruck einer großen Entfernung hervorgebracht werde, glaubt Zoth (ähnlich dann auch Guttmann) in der Blickrichtung das maßgebende Moment finden zu können. In der Tat bemerkten diese beiden Untersucher, daß auch andere Objekte, wenn sie unter sonst gleichen Bedingungen einmal mit horizontaler, dann mit gehobener Blickrichtung betrachtet werden, im letzteren Falle kleiner erscheinen. Allerdings sind die Unterschiede nicht gerade beträchtlich. Guttmann fand ihren Betrag gleich 3—4 %, was hinter dem Betrage, auf den ich für mich die Täuschung beim Monde veranschlagen kann, sicher weit zurückbleibt. Bourdon konnte eine Abhängigkeit des Größeneindruckes von der Blickrichtung überhaupt nicht finden. Un-

[1] Gauss, Briefwechsel zwischen G. und Bessel, herausgeg. von der preuß. Akademie der Wissenschaften. 1880. S. 498.

[2] Filehne, Pflügers Archiv. LIX. S. 279. 1895. — Zoth, Ebenda. LXXVIII. 1899. S. 363. — Derselbe, Ebenda. LXXXVIII. 1902. S. 201. — Reimann, Zeitschr. f. Psychologie. XXX. S. 1 und 161. 1902. XXXVII. S. 250. 1905. — Bourdon, La perception visuelle de l'espace. Paris 1902. S. 392. — Guttmann, Blickrichtung und Größenschätzung. Zeitschr. f. Psychol. XXXI. S. 333. 1903. — Bernstein, Das Leuchtturmphänomen und die scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes. Zeitschr. f. Psychol. XXXIV. S. 132. 1904. — Stratton, Der linearperspektivische Faktor in der Erscheinung des Himmelsgewölbes. Zeitschr. f. Psychol. XXVIII. S. 42. 1902. — A. Müller, Über den Einfluß der Blickrichtung auf die Gestalt des Himmelsgewölbes. Zeitschr. f. Psychol. XL. S. 74. 1905. — B. Mayr, Die scheinbare Vergrößerung von Sonne, Mond und Sternbildern am Horizont. Pflügers Archiv. CI. S. 349. 1904. — Feilchenfeld, Über die Größenschätzung im Sehfeld. Archiv f. Ophth. LIII. S. 401. 1904. — Claparède, L'agrandissement et la proximité apparents de la lune à l'horizon. Archives de psychol. V. S. 121. 1905.

zweifelhaft muß daher, wie auch ZOTH betont, die Wirksamkeit anderer Momente, wie z. B. der Luftperspektive, neben jenem anerkannt werden. Die Anschauung, daß wir aus Gründen, die mit der Beschaffenheit der Atmosphäre zusammenhängen, das Himmelsgewölbe als eine abgeflachte Schale sehn und daß das Größererscheinen in der Nähe des Horizontes hierauf beruhe, ist namentlich von REIMANN vertreten und in eigenartiger Weise des genaueren ausgeführt worden. Er ist dabei von der fast ganz allgemein, namentlich auch von HELMHOLTZ selbst geteilten Anschauung ausgegangen, daß der Eindruck der beträchtlicheren absoluten Größe mit dem einer größeren Entfernung vom Beschauer unmittelbar und genau zusammenhänge und in ihm seinen Grund finde. Meines Erachtens kann diese Annahme keineswegs als selbstverständlich zugrunde gelegt werden, und es eröffnen sich, sobald wir sie als zweifelhaft betrachten, für das ganze Problem wesentlich andere Gesichtspunkte. Auf die Gründe dieser Anschauung kann jedoch erst im Schlußkapitel des genaueren eingegangen werden, und es wird dort auf die Frage der scheinbaren Größe der Gestirne noch kurz zurückzukommen sein.

2. Die auf der Akkommodation beruhende Tiefenwahrnehmung ist später noch von HILLEBRAND[1], DIXON[2], ARRER[3] und BOURDON[4] untersucht worden. Dem erstgenannten gelang es, die Mitwirkung anderer Umstände noch vollständiger als bei der Fadenmethode auszuschließen, indem er einen die Hälfte des Gesichtsfeldes ausfüllenden schwarzen Schirm vor weißem Hintergrunde dem Beobachter annähern oder von ihm entfernen ließ. Es zeigte sich, daß die Leistung hier noch sehr viel mangelhafter ausfällt als bei den im Text erwähnten Beobachtungen WUNDTS.*

3. Die Erscheinung, daß in derselben Ebene befindliche Gegenstände verschiedener Farbe in ungleicher Entfernung zu liegen scheinen, ist später mehrfach, besonders eingehend von EINTHOVEN[5] beobachtet und studiert worden. Auch EXNER[6] hat kürzlich sehr hübsche Beobachtungen dieser Art mitgeteilt. EINTHOVEN hat gezeigt, daß die Erscheinung in der Hauptsache nicht auf die ungleiche Akkommodation für lang- und kurzwellige Lichter zurückzuführen ist; sie hat vielmehr ihren Grund in verwickelteren Verhältnissen dioptrischer Natur (Farbenzerstreuung und mangelhafte Zentrierung des Auges). Da das Interesse des Gegenstandes wesentlich in diesen dioptrischen Verhältnissen liegt, so darf von einer genaueren Behandlung desselben an dieser Stelle abgesehen werden.

4. Die mit der Bewegung des Beobachters verknüpften Änderungen in der Anordnung der gesehenen Gegenstände, wie sie HELMHOLTZ im Text beschrieben und in ihrer Bedeutung für die Entfernungswahrnehmung klargelegt hat, sind diejenigen, die (bei Fortbewegung des ganzen Körpers) einer unveränderten

[1] HILLEBRAND, Zeitschr. f. Psychol. VII. 1894. S. 97.

[2] DIXON, Mind 1895. S. 195.

[3] ARRER, WUNDTS Philos. Studien. 1896. S. 116 u. 222.

[4] BOURDON, *La perception visuelle de l'espace.* 1902.

[5] EINTHOVEN, *On the production of shadow and perspective effects by difference of colour.* Brain XVI. S. 191. — Derselbe, Stereoskopie durch Farbendifferenz. Archiv f. Ophth. XXXI. (3). S. 211.

[6] EXNER, Perspektivische Täuschungen an farbigen Bildern, die durch prismatische Brillen betrachtet werden. Zentralblatt f. Physiologie. 1906. S. 843.

* Über die Natur des hier in Betracht kommenden Zusammenhanges, namentlich die Annahme eines besonderen Akkommodationsgefühles, vgl. die Bemerkungen im Schlußkapitel. K.

Haltung des Kopfes und namentlich auch der Augen entsprechen würden. In Wirklichkeit komplizieren sich die Erscheinungen dadurch, daß, wenn wir unsere Aufmerksamkeit nicht etwa einem sich mit uns bewegenden Gegenstande, sondern äußeren ruhenden Objekten zuwenden, wir stets durch Drehung der Augen in einem unserer Bewegung entgegengesetzten Sinne für kurze Zeit die Fixation eines bestimmten Punktes festzuhalten pflegen. Hierdurch entstehen die bekannten zuckenden Bewegungen, die man an einer durch das Fenster des fahrenden Eisenbahnwagens hinausschauenden Person beobachten kann. Unter diesen Umständen bleibt immer für kurze Zeit das Netzhautbild des jeweils fixierten Punktes an seiner Stelle, während diejenigen entfernterer und näherer Objekte in entgegengesetztem Sinne über die Netzhaut hingleiten. Demgemäß scheinen, während der fixierte Punkt als ruhend wahrgenommen wird, jene (die entfernteren) im Sinne der Fahrtrichtung, die näheren im entgegengesetzten zu gleiten. Auch diese Scheinverschiebungen werden für die Entfernungseindrücke ganz ebenso wie die von Helmholtz in Betracht gezogenen bestimmend sein und im allgemeinen wohl mit ihnen in einer nicht analysierbaren Weise zusammenwirken.

5. Helmholtz hat hier die stereoskopische Parallaxe als einen Längenwert definiert, entsprechend einem bestimmten Abstande der Zeichnung von der durch die Augen des Beobachters gelegten Frontalebene. Im Laufe der Zeit hat sich das Bedürfnis herausgestellt, den Unterschied der Lage eines Punktes für rechtes und linkes Auge von dem einigermaßen willkürlichen Werte des Zeichnungsabstandes unabhängig zu definieren. Man hat demgemäß angefangen, gewisse hierzu geeignete Winkelgrößen in Betracht zu ziehen und als binokulare Parallaxe zu bezeichnen. Erwägt man, welchen Winkel man so nennen oder wie man die binokulare Parallaxe definieren soll, so bemerkt man leicht, daß sich dafür verschiedene Möglichkeiten bieten. Als die einfachste und den eingeführten Bezeichnungen sich am besten anschließende dürfte es sich empfehlen, daß wir binokulare Parallaxe eines Punktes die Differenz der Winkel nennen, um die seine Projektion in eine durch die Augen gelegte Horizontalebene für das rechte und linke Auge von der sagittalen Richtung abweicht. Sei also in Fig. 63 die Ebene der Zeichnung jene Horizontalebene, A und B die Orte der beiden Augen, P die Projektion des Punktes in unserer Ebene und S die sagittal gerichteten Linien, so würden wir die Differenz der Winkel SAP und SBP oder den Winkel APB als die binokulare Parallaxe jenes Punktes zu bezeichnen haben. Der so definierte Winkel stimmt nahezu überein mit der Differenz der Breitenwinkel (in dem von Helmholtz festgelegten Sinne) die der betreffende Punkt für das rechte und linke Auge besitzt, wenn diese horizontal und parallel geradeaus gerichtet sind. Er unterscheidet sich von ihr nur zufolge der Abweichung der scheinbar horizontalen und vertikalen Ebenen von den wirklich horizontalen und vertikalen und würde mit ihr identisch sein für Augen, bei denen diese Abweichung fehlte.

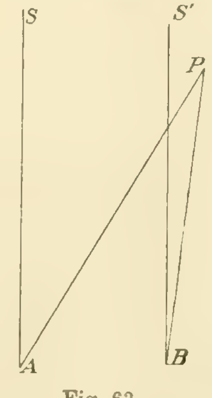


Fig. 63.

In vielen Fällen ist es von besonderem Interesse, den Wert in Betracht zu ziehen, um den die Parallaxe eines Punktes die des jeweilen Fixationspunktes übertrifft bzw. hinter ihr zurückbleibt, mit anderen Worten die Parallaxen von

der des Fixationspunktes als Nullpunkt zu zählen. Wir wollen daher diesen (positiven oder negativen) Betrag die **jeweilige Parallaxe** eines Punktes nennen. Im Gegensatze dazu kann, wo Mißverständnisse zu befürchten sind, die vorhin definierte die **absolute Parallaxe** heißen. Ferner können wir als **relative** oder gegenseitige Parallaxe zweier Punkte die Differenz ihrer absoluten Parallaxen bezeichnen. Sie gibt, wie ersichtlich, die jeweilige Parallaxe an, die dem einen Punkte zukommt, wenn der andere fixiert wird.[1]

Über die Werte der Parallaxen sei hier sogleich noch einiges hinzugefügt. Bezeichnen wir sie mit p, ferner (in Fig. 63) den Winkel $S'BP$ mit s, den Abstand der beiden Augen mit $2a$, und endlich mit F die Entfernung des Punktes P von der durch die Augen gelegten Frontalebene, so ist, wie leicht ersichtlich,

$$2a = F\{\operatorname{tg}(s+p) - \operatorname{tg} s\} \quad .$$

Für Punkte, die der Medianebene nahe und in nicht zu geringem Abstand vom Beobachter liegen, ist sowohl s als p klein, und es ist dann mit Annäherung

$$p = \frac{2a}{F} \quad .$$

Handelt es sich um Punkte, die auch der durch die Augen gelegten Horizontalebene nahe liegen, so kann für F auch ihr Abstand von den Augen selbst gesetzt werden, den wir E nennen. Für Punkte also, die sowohl der Medianebene wie der durch die Augen gelegten Horizontalebene nahe liegen, ist die binokulare Parallaxe $= \frac{2a}{E}$.

Für die relative Parallaxe zweier, der erwähnten Bedingung genügender Punkte erhalten wir den Wert

$$\frac{2a(E_1 - E_2)}{E_1 \cdot E_2} \quad .$$

Und handelt es sich um ein Punktpaar, dessen Tiefenabstand δ klein ist im Vergleich zu seiner Entfernung vom Beobachter, so können wir diese für beide einheitlich mit E bezeichnen und die relative Parallaxe durch die Formel

$$\frac{2a.\delta}{E^2}$$

ausdrücken.

Die relative Parallaxe, die einem bestimmten kleinen Tiefenunterschiede entspricht, ist also umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung, aus der die beiden um jenen Betrag voneinander abstehenden Punkte gesehen werden.

Im Interesse möglichster Präzision der Bezeichnung dürfte es sich empfehlen, den Ausdruck der binokularen Parallaxe streng in dem oben definierten rein geometrischen Sinne zu nehmen. Dagegen ist zu beachten, daß der insbesondere von Hering eingeführte Ausdruck der Querdisparation eine physiologische Bedeutung besitzt und im Hinblick auf physiologische Verhältnisse definiert ist. So haben wir namentlich eine Querdisparation Null einem Punkte dann zuzuschreiben, wenn seine Bildorte auf der rechten und linken Netzhaut

[1] Die etwas schwerfällige Nomenklatur vereinfacht sich, da in den meisten Fällen der Zusammenhang es ohne weiteres ersichtlich macht, in welchem Sinne von Parallaxe gesprochen wird, und daher die näheren Bezeichnungen (absolute, relative, jeweilige Parallaxe) in der Regel fortfallen können.

den gleichen Richtungseindruck oder zwei nur bezüglich der Höhe verschiedene Richtungseindrücke erzeugen. Ob dies für einen Punkt zutrifft, wird also nicht nur von seiner Lage und der jeweiligen Stellung der Augen, sondern außerdem auch noch von physiologischen Verhältnissen (der Verteilung der Ortswerte auf der Netzhaut im Sinne HERINGS) abhängen. Wo es ratsam und zulässig erscheint, in dieser Hinsicht gewisse vereinfachende Voraussetzungen zu machen, da wird man allerdings auch die Querdisparationen als Winkelgrößen behandeln und zu den binokularen Parallaxen in bestimmte Beziehung bringen dürfen, wie dies z. B. HILLEBRAND in seiner unten zu besprechenden Arbeit[1] tut. Und zwar kann man dann in gewissem Umfange die Querdisparation mit der jeweiligen Parallaxe identifizieren bzw. den letzteren geometrisch fixierten Wert als Maß für jenes physiologische Verhältnis benutzen.

6. Die hier mitgeteilten Versuche enthalten nicht eigentlich eine Ermittelung der der binokularen Tiefenwahrnehmung gesteckten Genauigkeitsgrenze. Vielmehr hat HELMHOLTZ sich mit der Feststellung begnügt, daß, wenn die Parallaxe denjenigen Wert erreicht, der für die monokulare Unterscheidung notwendig ist, auch bereits eine sichere Tiefenwahrnehmung stattfindet. Ob er auf eine wirkliche Bestimmung der Grenze verzichtet hat, weil ihm die Erreichung noch höherer Genauigkeitsgrade aus theoretischen Erwägungen unwahrscheinlich war, oder ob er aus anderen Gründen nicht dazu gekommen ist, läßt sich wohl nicht sicher entscheiden. Eine Reihe von Untersuchungen neuerer Zeit hat gelehrt, daß in der Tat noch bei wesentlich geringeren als den von HELMHOLTZ als genügend gefundenen Werten der Parallaxe eine sichere Tiefenwahrnehmung möglich ist. Bei Versuchen dieser Art fand HEINE[2] für verschiedene Personen 6—13 Sekunden, PULFRICH[3] 10 und noch weniger; in den von BOURDON[4] angestellten Versuchen wurde bei einer Parallaxe von nur 5 Sekunden der Tiefenunterschied wenigstens in der großen Mehrzahl der Fälle noch richtig erkannt. Die Versuche dieser Art sind alle im wesentlichen nach dem auch von HELMHOLTZ benutzten Verfahren ausgeführt. Es werden drei parallele senkrechte Stäbe beobachtet, von denen die beiden äußeren fest in einer frontalen Ebene aufgestellt sind. Der mittlere kann in sagittaler Richtung verschoben werden, und es wird entweder geprüft, bei welcher Abweichung von der durch die beiden anderen gelegten Ebene er mit Sicherheit als vor oder hinter ihnen befindlich wahrgenommen wird, oder es wird der mittlere Fehler bestimmt, den der Beobachter macht, wenn ihm die Aufgabe gestellt ist, den mittleren Stab in die Ebene der äußeren einzustellen. Durch einen Schirm mit passendem Ausschnitt ist Sorge getragen, daß der Beobachter nur ein mittleres Stück jedes Stabes, nicht aber Befestigungen, Träger usw. sehen kann, wodurch andere Momente, die etwa den Entfernungseindruck bestimmen könnten, ausgeschlossen werden. Bei diesen Versuchen kann, wie oben gezeigt, die Parallaxe $= \frac{2a \cdot \delta}{E^2}$ gesetzt werden, wenn $2a$ der Augenabstand, E die Entfernung der Stäbe vom Beobachter, δ die Entfernung ist, in die der mittlere Stab vor oder hinter der Ebene der äußeren liegt. — Übrigens erscheint es mir nicht eigentlich zutreffend, wenn man auf Grund dieser Tatsachen den all-

[1] Denkschriften der Wiener Akademie. Math.-naturw. Klasse 72. 1902.
[2] HEINE, Archiv f. Ophth. LI. 1900. S. 146.
[3] PULFRICH, Physikal. Zeitschrift 1899. Ders., Zeitschrift f. Instrumentenkunde 1901.
[4] BOURDON, *Revue philosophique*. XXV. 1900. S. 74.

gemeinen von HELMHOLTZ aufgestellten Satz, daß die Feinheit der binokularen Tiefenwahrnehmung etwa mit der monokularen Unterscheidungsfähigkeit übereinstimme, für unrichtig erklärt hat. Die Tatsachen gestatten vielmehr die Betrachtung auch aus einem anderen, meines Erachtens bedeutungsvolleren Gesichtspunkt. Es ist nämlich gerade nur die monokulare Unterscheidungsfähigkeit für gleichzeitig nebeneinander gesehene Punkte oder parallele Linien, die so weit hinter der binokularen Tiefenwahrnehmung zurückbleibt. Dagegen hat sich herausgestellt, daß bei anderen Verfahrungsweisen ähnliche Winkelgrößen wie sie für die binokulare Tiefenwahrnehmung hinreichen (etwa 10''), auch in das Gebiet des monokular bemerkbaren fallen. So bei der sogenannten Noniusmethode, bei der es sich darum handelt, zu erkennen, ob ein Linienstück in die genaue Fortsetzung eines anderen fällt oder ihm gegenüber eine Parallelverschiebung besitzt[1]; ebenso auch bei Wahrnehmung kleinster Bewegungen[2].

Es ist hiernach wohl berechtigt zu sagen, daß die von HELMHOLTZ vermutete Beziehung doch in der Tat annähernd verwirklicht zu sein scheint. Nur ist das, was wir beim monokularen Sehen mit der binokularen Tiefenwahrnehmung in Parallele setzen können, nicht das Getrenntscheinen nebeneinander sichtbarer Objekte, sondern eher gewisse andere Aufgaben, wie sie eben bei der Noniusmethode und der Wahrnehmung von Bewegungen ins Spiel kommen. Daß auch diese mit der der Tiefenwahrnehmung nicht streng identifiziert werden können, ist freilich selbstverständlich, und wir werden daher auch hier immer nur eine annähernde Übereinstimmung erwarten dürfen.

7. Dem von HELMHOLTZ hier mit Recht gegen die WUNDTschen Versuche erhobenen Bedenken ist BOURDON[3] in der Weise entgangen, daß er nicht den Gegenstand annähern oder entfernen, sondern einerseits ein in bestimmter fester Entfernung gelegenes, anderseits ein näheres oder entfernteres Objekt für kurze Zeiten im sonst dunkeln Raume sichtbar machte, wobei zwischen dem Sehen des einen und andern ein zeitlicher Zwischenraum eingeschaltet war, währenddessen die Augen beliebig bewegt wurden. Durch besondere Vorsichtsmaßregeln konnte der Einfluß der mit der Entfernungsvariierung verknüpften Helligkeits- und Größenänderung ausgeschaltet werden. Als Objekt dienten für kurze Zeit aufleuchtende Punkte.

Die bei diesem Verfahren erhaltenen Ergebnisse enthält die folgende Tabelle.

Relative Entfernungsschätzung.

Fixer Punkt in 1 m Entfernung.

Entfernungen des beweglichen Punktes *m*	Relative Parallaxe	Antworten: Richtig	Zweifelhaft	Falsch
1,08	16′	5	14	1
1,12	24′	12	4	4
1,16	32′	10	7	3
1,20	38′	17	3	—
1,24	44′	19	1	—
1,28	50′	20	—	
1,32	54′	20	—	—

[1]) WÜLFING, Zeitschr. für Biologie. N. F. XI. S. 199. 1893.

[2]) Basler, PFLÜGERS Archiv. CV. S. 582. 1906 und ebenda CXXIV. S. 313. 1908.

[3]) *La perception visuelle de l'espace.* 1902. S. 237.

Beträchtlich günstigere Resultate ließen sich erzielen, wenn die beiden Punkte nicht nur einmal, sondern mehrfach wiederholt zur Beobachtung dargeboten wurden, wie dies in der nachstehenden Tabelle zum Ausdruck kommt.

Distanzen in Metern	Antworten:		
	Richtig	Zweifelhaft	Falsch
25—15	1	16	3
25—14	5	8	7
25—13	10	7	3
25—12	12	8	0
25—11	15	2	3
25—10	17	2	1

Drückt man die für die Merkbarkeit erforderliche Konvergenzänderung in Winkelwerten aus, so ergibt sich ganz ebenso wie für die Wundtschen Versuche, daß bei geringer Konvergenz (also großen Entfernungen) schon geringere Änderungen merkbar sind als bei starker Konvergenz. So berechnet Bourdon für Entfernungen des festen Punktes von 10, 2 und 1 m die eben merkbaren Drehungen des einzelnen Auges auf 7, 19 und 25 Minuten. Die Werte sind (wie bei dem Unterschiede des Verfahrens begreiflich) erheblich höher als die aus den Versuchen Wundts sich berechnenden, die Helmholtz im Text anführt.

8. Für die S. 269 erörterte Frage, in welcher Tiefenanordnung Punkte des Längshoropters gesehen werden, ob sie insbesondere, wie es Hering annahm, in einer frontalen bzw. zur Blickrichtung senkrechten Ebene erscheinen, haben sich die Grundlagen dadurch verschoben, daß eine Voraussetzung, von der man ursprünglich ausgegangen war, in Frage gestellt worden ist, die nämlich, daß solche Punkte korrespondierende sind, die in den Netzhauthorizonten um gleiche Winkelabstände vom Zentrum abstehen. Wie im nächsten Paragraphen (bei der Lehre vom Horopter) zu besprechen ist, hat Hering es wahrscheinlich gemacht, daß dies nicht streng der Fall ist. Aus der bekannten sogenannten Kundtschen Täuschung (den Fehlern, die man macht, wenn man bei einäugiger Betrachtung eine von rechts nach links verlaufende horizontale Linie zu halbieren sucht) kann nämlich geschlossen werden, daß die vom Fixationspunkt lateralwärts gerichteten Erstreckungen ein wenig unter-, die medialwärts gerichteten ein wenig überschätzt werden, oder daß von zwei gleichweit rechts und links vom Zentrum abstehenden Netzhautpunkten der nasalwärts gelegene (der äußeren Gesichtshälfte entsprechende) einen etwas kleineren „Breitenwert" habe als der temporalwärts gelegene (der medialen Gesichtsfeldhälfte zugehörige). Geht man hiervon aus, so kann man weiter annehmen, daß Objekte in einer auf der Blickrichtung senkrechten Ebene nicht dann erscheinen, wenn sie im mathematischen, sondern in dem von diesem zufolge jener Unsymmetrie abweichenden physiologischen Horopter liegen.

Zugunsten dieser Annahme sprechen die quantitativen Ermittelungen Franks.[1] Dieser fand die Ergebnisse der einäugig ausgeführten Teilungsversuche in befriedigender Übereinstimmung mit dem, was auf Grund von „Horopterermittelungen" im obigen Sinne, d. h. Ermittelungen über diejenige Anordnung,

[1] Pflügers Archiv CIX. S. 63. 1905.

die erforderlich ist, um Objekte in einer zur Blickrichtung senkrechten Ebene erscheinen zu lassen, zu erwarten war.

Auch für die im Text mitgeteilten Beobachtungen von HELMHOLTZ würde sich nun hiermit insofern eine veränderte Deutung ergeben, als man, wenn wir bezüglich des Horopters eine abweichende Annahme machen oder auch seine Gestalt zunächst als ungewiß dahingestellt lassen, aus ihnen natürlich nicht mehr einen Schluß auf die Tiefenlokalisation der im Horopter gelegenen Punkte zu ziehen berechtigt ist. Mit der von HERING vertretenen Anschauung bleiben sie jedoch gleichwohl schon insofern im Widerspruch, als ihnen zufolge überhaupt bestimmten Punktpaaren der rechten und linken Netzhaut keine derart fixierte Beziehung hinsichtlich der Tiefenlokalisation zukommen würde, vielmehr der Tiefeneindruck, den auf sie fallende übereinstimmende Netzhautbilder erzeugen, noch von anderen Umständen, insbesondere der scheinbaren Entfernung des Fixationspunktes in entscheidender Weise mitbestimmt werden sollte. Lassen wir, wie demgemäß zur klaren Auseinanderhaltung der Probleme ratsam erscheint, die Frage der Beziehung zum Horopter zunächst ganz beiseite, so ergibt sich als wichtigste und hier mit bezug auf die Tiefenlokalisation in erster Linie interessierende Frage die, ob überhaupt bestimmten Punktpaaren der rechten und linken Netzhaut unter allen Umständen, insbesondere bei verschiedener Entfernung, die Eigenschaft zukommt, den Eindruck eines in jener Ebene gelegenen Objektes zu erzeugen. Eben dies ist es, was HELMHOLTZ verneinte, da seine Beobachtungen ihn zu dem Schlusse führten, daß es dabei auf den absoluten Entfernungseindruck mit ankomme und daß bei gleichbleibender Anordnung der Gegenstände durch Beeinflussungen der scheinbaren Entfernung auch ihre relative Tiefenanordnung modifiziert werden könne. Diese Verhältnisse sind in neuerer Zeit von HILLEBRAND[1] geprüft worden, der zu dem entgegengesetzten Resultate gelangte. Ihm zufolge sind es fest bestimmte Punktpaare, die den Eindruck eines in der „Kernfläche" gelegenen Gegenstandes erzeugen; und diese Beziehung ist unabhängig insbesondere davon, welchen Konvergenzgrad die Augen besitzen und in welcher Entfernung die Gegenstände wahrgenommen werden. HILLEBRAND hat dies als die Stabilität der Raumwerte bezeichnet.

Ob die Frage durch diese Beobachtungen wirklich endgültig entschieden ist, scheint mir, abgesehen von anderen Gründen, schon deswegen einigermaßen zweifelhaft, weil bei Gegenständen wie dem hier vorliegenden mit der Möglichkeit individueller Verschiedenheiten jedenfalls gerechnet werden muß[2]. Ob der

[1] HILLEBRAND, Zeitschrift für Psychologie V. S. 1. 1893.

[2] HILLEBRAND stellte unter gewissen Bedingungen bezüglich Konvergenz und scheinbarer Entfernung die Fäden so ein, daß sie in einer frontalen Ebene zu liegen schienen, veränderte dann jene Bedingungen und fand, daß sie auch jetzt in einer frontalen Ebene zu liegen schienen. Überzeugender wäre es jedenfalls gewesen, unter verschiedenen Bedingungen die Einstellungen wiederholt auszuführen und darzutun, daß die Ergebnisse innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmten. Auch sind die Beobachtungen auf verhältnismäßig kleine Exzentrizitäten beschränkt. Versuche, die in jüngster Zeit von Herrn Dr. v. LIEBERMANN in meinem Institut ausgeführt wurden, haben in der Tat gezeigt, daß die HILLEBRANDsche Regel für ihn nicht zutrifft. Er stellte seitlich gelegene Objekte so ein, daß sie in der durch den Fixationspunkt gelegten Frontalebene zu liegen schienen. Übereinstimmend mit den früheren Beobachtern fand er dabei, daß hierfür Anordnungen erforderlich waren, die vom mathematischen Horopter etwas abweichen. Diese Abweichungen (oder die zur Lokalisation in der Frontalebene erforderlichen Parallaxen) waren aber nicht konstant, sondern zeigten eine unverkennbare und regelmäßige Abhängigkeit von der absoluten Entfernung des Fixationspunktes.

Grund für die abweichenden Resultate, zu denen HELMHOLTZ gelangte, in den von HILLEBRAND erörterten Umständen zu suchen ist, dürfte sich daher auch vorderhand einer sicheren Beurteilung entziehen.

Es sind an dieser Stelle ferner Versuche von TSCHERMAK und KIRIBUCHI[1] zu erwähnen. Die Verfasser bezeichnen zwar selbst als Gegenstand ihrer Untersuchung die Ermittelung des Längshoropters. Sie gehen aber dabei von der soeben besprochenen Annahme HERINGs aus, daß die im Längshoropter gelegenen Punkte in einer auf der Blickrichtung senkrechten Ebene lokalisiert werden; und was sie in Wirklichkeit bestimmten, ist nicht sowohl der Horopter, als vielmehr die Lage, die Linien haben müssen, um in einer solchen Ebene gesehen zu werden. Sie fanden hierbei einen Unterschied, je nachdem dauernd sichtbare senkrechte Fäden oder herabfallende Kugeln beobachtet wurden. Und zwar ergab sich für die fallenden Kugeln eine stärker gegen den Beobachter konkave Kurve als für die Fäden. Die Versuche lehren, daß die Tiefenlokalisation (das Erscheinen in einer zur Blickrichtung normalen Ebene) von der Art der gesehenen Gegenstände abhängt. Wie mir scheint, kann hieraus nur geschlossen werden, daß eben jene uns hier beschäftigende Annahme, die Lokalisation des auf korrespondierenden Punkten Abgebildeten in einer fest bestimmten Kernfläche sich als nicht allgemein zutreffend herausstellt.[2]

9. Es sind oben, teils im Text, teils in den Hinzufügungen eine Reihe von Bestimmungen über die Leistungsgrenze der verschiedenen für die Tiefenwahrnehmung in Betracht kommenden Momente gemacht worden, d. h. über diejenigen Tiefenwerte, die gerade an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegen, wenn eines jener Momente unter sorgfältigem Ausschluß aller übrigen für sich allein ins Spiel kommt. Bestimmmungen dieser Art liegen vor für Akkommodation, Konvergenz und binokulare Parallaxe. Die mannigfaltige und schwer fixierbare Natur der sonstigen den Entfernungseindruck bestimmenden Verhältnisse (Luftperspektive, scheinbare Größe usw.) bringt es mit sich, daß analoge Ermittelungen für sie nicht wohl in Frage kommen können. Nach dem, was uns auf anderen Sinnesgebieten und beim Gesichtssinn auch bz. der Richtungslokalisation und der Anordnung des Gesehenen im Gesichtsfelde geläufig ist, können wir weiter auch nach der Größe der unter diesen oder jenen Umständen

[1] TSCHERMAK und KIRIBUCHI, PFLÜGERS Archiv. LXXXI. 1900. S. 328.

[2] Die Verfasser ziehen diesen Schluß nicht; sie gelangen vielmehr, indem sie von jener mehrerwähnten HERINGschen Voraussetzung als einer völlig feststehenden Tatsache ausgehen, dazu, einen zweifachen Horopter (Lot- und Fallhoropter) anzunehmen. Es ist indessen mindestens schwer ersichtlich, was eine solche Duplizität des Horopters eigentlich besagen, noch schwerer, wie sie mit den HERINGschen Vorstellungen über Wesen und Bedeutung des Horopters zu vereinbaren ist. Und wir müssen betonen, daß die Versuche keinerlei zwingenden Grund für jene Annahme enthalten. Möglich und sogar viel näher liegend erscheint die andere Auffassung, daß eben nicht unter allen Umständen die im Horopter liegenden Punkte in die Frontalebene lokalisiert werden.

Es ist, wie mir scheint, zu bedauern, daß die Verfasser Beobachtungen über Tiefenlokalisation kurzerhand Horopterermittelungen nennen, somit ihre Versuchsergebnisse nicht nach dem bezeichnen, was sie unmittelbar bedeuten, sondern nach dem, was sie unter einer doch mindestens zweifelhaften Voraussetzung bedeuten würden, wodurch ein richtiger Einblick in die Verhältnisse erschwert und Mißverständnisse nahegelegt werden. Um die verschiedenen Fragen klar auseinanderzuhalten, muß man, wie hier nochmals betont sei, vor allem im Auge behalten, daß die Beobachtungen von TSCHERMAK und KIRIBUCHI Ermittelungen über Tiefenlokalisation, nicht aber Horopterermittelungen im hergebrachten und feststehenden Sinne dieses Wortes sind.

erzeugten übermerklichen Entfernungseindrücke fragen, nach der Genauigkeit, mit der sie verglichen werden, etwaigen bei dieser Vergleichung eintretenden regelmäßigen Fehlern, mit einem Worte nach dem Augenmaß für die Tiefenerstreckungen. Genauere und namentlich messende Ermittelungen in bezug auf diese Augenmaßverhältnisse sind, wie sich leicht denken läßt, auch nur in beschränktem Umfange möglich. Denn es leuchtet ein, daß nicht nur die sogen. empirischen Momente wie Luftperspektive, Verlauf der Umrisse usw., sondern auch Konvergenz und Akkommodation bei der geringen Sicherheit, die ihnen zukommt, derartige Feststellungen kaum gestatten. Es bleibt daher als einziges, hier in Frage kommendes Gebiet das der binokularen Entfernungswahrnehmung. Wir haben hier in den binokularen Parallaxen eine scharf angebbare und auch quantitativ zu bestimmende Grundlage der Tiefenwahrnehmung und können somit in Analogie sonstiger sinnesphysiologischer Betrachtungsweisen die Frage aufwerfen, in welcher Weise die Entfernungseindrücke von ihnen abhängen. Diese Frage führt sogleich auf einige sehr einfache Überlegungen. Die absolute Parallaxe eines einzelnen Sehobjektes hat, wie die Erfahrungen über die Konvergenz zeigen, für den Entfernungseindruck nur sehr geringe Bedeutung. Was für die binokulare Tiefenwahrnehmung in Betracht kommt, sind also die relativen Parallaxen, die Unterschiede der Parallaxe, wie sie bei der Betrachtung einer Mehrzahl von Punkten oder eines komplizierteren Gegenstandes gegeben sind. Bei der dominierenden Rolle, die dem Fixationspunkt überhaupt zukommt, wird man vermuten dürfen, daß es die Eindrücke einer Tiefenanordnung im Vergleich zu diesem sind, die in einer relativ einfach angebbaren Weise durch die Verhältnisse des binokularen Sehens sich bestimmen. Für die Tiefenlage eines Punktes im Verhältnis zum Fixationspunkt wird nun derjenige Wert, den wir als seine jeweilige Parallaxe bezeichneten, maßgebend in Betracht kommen müssen. Stellen wir uns auf den Boden der Hering schen Anschauungen, so können wir noch spezieller vermuten, daß es dabei auf die Querdisparationen ankommen wird, die, wie wir oben sahen, den jeweiligen Parallaxen nahestehen. So würde sich denn die Frage erheben, welchen relativen Tiefeneindruck (scheinbaren Tiefenstand vom Fixationspunkt) eine bestimmte jeweilige Parallaxe (Querdisparation) hervorruft, oder welche funktionelle Beziehung zwischen jeweiliger Parallaxe (Querdisparation) und Tiefeneindruck stattfindet. Hier ist nun vor allem zu erwägen, ob eine bestimmte jeweilige Parallaxe allemal den Eindruck einer Tiefenerstreckung von bestimmtem Betrage erzeugt. Und man sieht sogleich, daß diese Frage mit größter Wahrscheinlichkeit verneint werden muß. Denn wie wir früher sahen, ist ja für zwei Punkte mit bestimmtem Tiefenabstand die relative Parallaxe um so kleiner, je größer die Entfernung beider vom Beobachter ist.[1] Eine bestimmte relative Parallaxe zweier Sehobjekte entspricht also je nach ihrer absoluten Entfernung sehr ungleichen Tiefenunterschieden. Daraus geht schon hervor, daß, wenn zwischen jeweiliger Parallaxe und Tiefeneindruck eine ganz feste quantitative Beziehung bestünde, derart, daß jedem Betrage der Parallaxe der Eindruck eines bestimmten immer gleichen Tiefenabstandes vom Fixationspunkt entspräche, ein solcher Zusammenhang die gröbsten Täuschungen involvieren würde; wir würden (und zwar

[1] Wir fanden sie für Punktpaare, die in der Horizontalebene und nahe der Medianebene liegen bei einem kleinen Tiefenunterschied $= \frac{\delta \cdot 2a}{E^2}$, also umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes vom Beobachter.

in enormem Betrage) die Tiefenabstände entfernter Gegenstände unter- und diejenigen naher Gegenstände überschätzen. Daß dies nicht der Fall ist, scheint schon die gewöhnliche Erfahrung zu lehren. Freilich kann man gegen die Bekundungen dieser den Einwand erheben, daß hier die binokulare Tiefenwahrnehmung nicht für sich allein zur Geltung kommt, sondern eine Reihe andersartiger Umstände, eben die sogenannten empirischen Momente, dabei mitwirken. Es erschien aus diesem Grunde wünschenswert, ähnlich wie es bei den Versuchen über die Genauigkeitsgrenzen geschehen, alle übrigen Hilfsmittel auszuschließen und die Vergleichung übermerklicher, möglichst rein binokular wahrgenommener Tiefenerstreckungen zu prüfen. Versuche dieser Art sind von Issel[1] ausgeführt worden. Er verfuhr zunächst so, daß er sich die Aufgabe stellte, einen in der Medianebene verschieblichen Stab genau in die Mitte zwischen zwei durch Stäbe markierten frontalen Ebenen einzustellen. Wäre die Einstellung auf gleiche binokulare Parallaxen erfolgt, so hätte ein beträchtlicher Fehler in dem Sinne entstehen müssen, daß der Stab der vorderen dem Beobachter näheren Ebene zu nahe, diesseits der wahren Mitte eingestellt worden wäre. Das war aber keineswegs der Fall; die Einstellungen waren durchschnittlich annähernd richtig (mit einem kleinen Fehler in dem dem eben angegebenen entgegengesetzten Sinne). Ferner wurde die Aufgabe gestellt, einen Stab gerade so weit hinter oder vor) eine entfernte frontale Ebene einzustellen, wie ein anderer vor oder hinter) einer näheren Ebene stand. In diesem Falle wurden also nicht, wie im vorigen, zwei aneinander stoßende, sondern zwei durch einen beträchtlichen Abstand getrennte Tiefenerstreckungen verglichen. Auch hier wurden Abstände für gleich gehalten, die keineswegs gleichen Parallaxen entsprachen. Die Versuche bestätigen also unzweideutig, was sich im voraus nach dem Gesichtspunkt der Zweckmäßigkeit mit einiger Wahrscheinlichkeit erwarten ließ: die Frage nach der quantitativen Abhängigkeit des Tiefeneindruckes von der binokularen Parallaxe ist überhaupt nicht durch die Angabe einer bestimmten durchgängig gültigen funktionellen Beziehung, sondern nur unter Einbeziehung einer weiteren Veränderlichen zu beantworten. Welchen Tiefeneindruck uns eine bestimmte jeweilige Parallaxe (Querdisparation hervorruft, das richtet sich nicht allein nach deren Betrage, sondern es wird stets in ganz entscheidender Weise durch die absolute Entfernung mitbestimmt, in der wir den Fixationspunkt sehen.

Versucht man auf dieser Grundlage für die durch irgendwelche Verhältnisse des binokularen Sehens erzeugten Tiefeneindrücke eine bestimmte Regel aufzustellen, so wird sich als nächstliegende Annahme die bieten, daß die Verhältnisse etwa in der Art geordnet sind, daß sie keinen Anlaß zu gröberen und regelmäßigen Täuschungen bieten. Dies würde der Fall sein, wenn bei einer bestimmten scheinbaren Entfernung des Fixationspunktes E die einem anderen Punkte zukommende jeweilige Parallaxe den Eindruck etwa desjenigen Tiefenabstandes erzeugte, bei dem der Punkt diese Parallaxe besitzen würde, wenn sich der Fixationspunkt tatsächlich in der Entfernung E befände.

Unter diesen Umständen würde mit einer annähernd richtigen Auffassung die Entfernung des Fixationspunktes allemal auch eine annähernd richtige binokulare Wahrnehmung der Tiefenverhältnisse verknüpft sein.

[1] Issel, Messende Versuche über binokulare Entfernungswahrnehmung. Dissert. Freiburg 1907.

Diese Regel würde einerseits einen bestimmten funktionellen Zusammenhang zwischen der scheinbaren Entfernung des Fixationspunktes und dem irgendeiner Parallaxe entsprechenden Tiefeneindruck besagen; sie würde aber zugleich auch bedeuten, daß bei gegebener (scheinbarer) Entfernung des Fixationspunktes zwischen dem Betrage der Parallaxen für verschiedene Punkte und den Tiefenabständen, in denen sie gesehen werden, ein bestimmtes und nicht ganz einfaches Abhängigkeitsverhältnis besteht[1]. Wir können eine in dieser Weise quantitativ geregelte binokulare Tiefenwahrnehmung eine relativ richtige oder wohl auch kurz eine **proportionierte** nennen; und ich will, da sie uns sogleich und auch später wiederholt noch beschäftigen wird, somit eine bestimmte Bezeichnung für sie erwünscht ist, den letzteren Ausdruck dafür im folgenden festhalten. Sie ist, um ihr wesentliches Kriterium nochmals kurz zu bezeichnen, dadurch charakterisiert, daß, wenn die wahren Entfernungen des fixierten und eines anderen Punktes F und E, die scheinbaren F' und E' sind, die relative Parallaxe zwischen F' und E' gleich derjenigen zwischen F und E wäre. Unter den vorhin besprochenen Bedingungen, unter denen die absolute Parallaxe eines Punktes $= \frac{2a}{E}$ gesetzt werden kann, erhalten wir also einfach

$$\frac{1}{F} - \frac{1}{E} = \frac{1}{F'} - \frac{1}{E'}.$$

Wird eine größere Zahl von Punkten gesehen, deren jeder ohne Änderung der scheinbaren Entfernungen Fixationspunkt sein kann, so wird die Wahrnehmung eine proportionierte sein, wenn für zwei beliebige Punkte die relative Parallaxe ihrer scheinbaren Entfernungen gleich der ihrer wahren Entfernungen ist, eine Bedingung, die bei analoger Bezeichnung sich durch die Gleichung

$$\frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_n'} - \frac{1}{E_m'}$$

ausdrücken würde.

Die Annahme einer proportionierten binokularen Tiefenwahrnehmung wird sich wie gesagt jedenfalls als die nächstliegende und als Ausgangspunkt weiterer Prüfungen empfehlen. Sie kann freilich, wie sich von selbst versteht, schon insofern nur als eine approximative gelten, als sich die subjektiven Werte der wahrgenommenen Tiefen einer ganz strengen Größenbestimmung überhaupt entziehen. Auch muß sogleich bemerkt werden, daß eine genauere Prüfung schon deswegen großen Schwierigkeiten begegnet, weil wir naturgemäß über die scheinbare Entfernung des Fixationspunktes niemals mit Sicherheit und Genauigkeit unterrichtet sein können. So ist denn auch das Beobachtungsmaterial, an dem wir unsere Annahme prüfen können, ein beschränktes und vielfach nur schwer verwertbares.

[1] Ist E die Entfernung des Fixationspunktes, p die jeweilige Parallaxe eines im Tiefenabstand t vor oder hinter diesem liegenden, so ist $p = \frac{2a \cdot t}{E(E+t)}$,

somit
$$t = \frac{p E^2}{2a - p E}.$$

Von einer ähnlichen Form müßte also auch die Abhängigkeit der gesehenen Tiefenabstände von den Parallaxen sein.

Als eine erste Gruppe von Beobachtungen können wir hier diejenigen erwähnen, in denen binokular wahrgenommene Tiefenerstreckungen mit Abmessungen, die der Frontalebene parallel sind (Höhen- oder Breitenerstreckungen) verglichen werden. Von der richtigen oder unrichtigen Auffassung dieses Verhältnisses wird es abhängen, ob uns die Gegenstände in ihrer wahren geometrischen Gestalt oder verzerrt (abgeflacht oder mit übertriebener Tiefe) erscheinen. Dieser Kategorie gehören die Beobachtungen von Heine[1] an.

Dieser prüfte, welche Anordnung drei senkrechte Stäbe haben müssen, um als Kanten eines gleichseitigen Prismas zu erscheinen und fand, daß nur innerhalb eines mäßigen Bereiches sie so gesehen werden, wenn sie objektiv) als solche angeordnet sind. Jenseits dieses Bereiches werden sie mit zu geringer, diesseits mit zu großer Tiefe gesehen, und die Anordnung muß also, um den Eindruck des gleichseitigen Prismas zu erhalten, hier in dem einen, dort in dem anderen Sinne von der objektiven Gleichseitigkeit abweichen. Heine betont jedoch, daß Nebenumstände, wie z. B. die Beleuchtung, auf diese Verhältnisse von beträchtlichem Einflusse sind, und ist demgemäß auch geneigt anzunehmen, daß die Gegenstände außerhalb des erwähnten Bereiches in toto in unrichtigen Entfernungen gesehen werden, und daß hierin der Grund für den unrichtigen Eindruck der Tiefe bzw. der Form zu finden sei.

Es sind ferner von Elschnig (Archiv f. Ophth. LII, 1901, S. 294 u. LIV, 1902, S. 111) gewisse Täuschungen der binokularen Tiefenwahrnehmung beobachtet worden, die eine Abweichung von der obigen Regel zu ergeben scheinen. Ich glaube indessen, daß gerade bei diesen Versuchen eigentümliche Bedingungen gegeben sind, die eine Schlußfolgerung in diesem Sinne nicht gestatten. Eine richtige binokulare Tiefenwahrnehmung muß ja nämlich unter allen Umständen an die Bedingung geknüpft sein, daß die Netzhautbilder, die zu einem einheitlichen Eindruck vereinigt werden, und deren Querdisparation also den Tiefeneindruck bestimmt, wirklich die Bilder des nämlichen äußeren Punktes sind. Sobald wir Bedingungen herstellen, in denen dies nicht der Fall ist, wird die Möglichkeit für die mannigfaltigsten Täuschungen gegeben sein. Wenn wir z. B. in der Art des bekannten Tapetenbilderversuches zwei verschiedene Teile des Musters binokular zur Vereinigung bringen, so wird ein auf der Tapete vorhandener Fleck in beträchtlicher Querdisparation gesehen werden, und sofern eine binokulare Tiefenwahrnehmung für ihn resultiert, in einer gewissen Entfernung von der Fläche erscheinen, vor ihr, wenn sich die Blicklinien hinter der Ebene des Papiers kreuzen, hinter ihr, wenn das Entgegengesetzte der Fall ist.

Die Beobachtungen Elschnigs betreffen nun die Erscheinung von Kugeln; und zwar bemerkte er in erster Linie bei der stereoskopischen Vereinigung photographischer Aufnahmen, aber auch bei der direkten Betrachtung von Kugeln, daß der Eindruck nicht einer Kugel, sondern eines eiförmigen, in der sagittalen Richtung gegen den Beschauer hin verlängerten Gebildes entstand. Man wird nun jedenfalls beachten müssen, daß bei der Betrachtung runder Körper ganz eigenartige Bedingungen gegeben sind. Beide Augen sehen die Kugel von einem kreisförmigen Umriß begrenzt, und es wird anzunehmen sein, daß diese beiden Umrisse binokular vereinigt werden. Sie entsprechen aber nicht derselben, sondern zwei verschiedenen, auf der Kugeloberfläche um ein gewisses Stück auseinanderliegenden Kreislinien. Ist, wie es in den Elschnigschen Versuchen der Fall war, der dem Beschauer zugewandte Pol markiert, so ist die Lage dieser Marke im rechts- und linksäugigen Bilde gegenüber diesen Umrißkreisen beträchtlich stärker verschieden, als sie es gegenüber einem und demselben Kreise von gleicher Größe sein würde, falls ein solcher beiden Augen zugleich

[1] Heine, Archiv f. Ophth. LI. 1900. S. 563.

in ganzer Ausdehnung sichtbar wäre; und wenn jedes Auge einen Punkt der ihm sichtbaren Umrißlinie betrachtet, so wird der Pol unter einer beträchtlich stärkeren Querdisparation gesehen als wenn beide Augen den nämlichen Punkt der Kugeloberfläche fixierten. Es erscheint also ganz verständlich, daß hierdurch eine Übertreibung der Tiefe zustande kommt.

Nun wird allerdings später noch des genaueren zu besprechen sein, daß bei der Betrachtung stereoskopischer Photographien noch mannigfaltige andere Bedingungen ins Spiel kommen; und auch bei der direkten Betrachtung wirklicher Kugeln könnte eine Täuschung über die absolute Entfernung eine unrichtige Formwahrnehmung bewirken. Da indessen die erwähnten Täuschungen gerade unter Bedingungen beobachtet wurden, in denen derartiges mit Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist, so wird wohl die Vermutung berechtigt sein, daß wir in den hier hervorgehobenen Umständen den eigentlichen Grund derselben erblicken dürfen.

Mit der hier gegebenen Erklärung steht es auch im Einklange, daß Elschnig, wenn er durch Verminderung der Aufnahmebasis für die stereoskopischen Photographien das Relief abschwächte, unter Umständen den Eindruck eines in der Nähe des Poles bereits abgeflachten, in der Nähe des Umrisses aber immer noch in die Länge gezogenen Gebildes erhielt.

Jedenfalls kann man sagen, daß runde Objekte, die einen lediglich durch die Sichtbarkeitsverhältnisse bedingten Umriß darbieten, wegen der hier hervorgehobenen Besonderheiten zur Prüfung der Tiefenwahrnehmung ungeeignet sind, und daß es nicht berechtigt wäre, aus den Beobachtungen dieser Art eine Abweichung von der obigen Regel zu schließen, derzufolge die binokularen Wahrnehmungen mit den realen Verhältnissen annähernd übereinstimmende Tiefeneindrücke ergeben.

An zweiter Stelle kann das Augenmaß für Tiefen auch in dem Sinne geprüft werden, daß lediglich die Vergleichung zweier oder mehrerer Tiefenerstreckungen in Frage kommt. Auch für diese Versuche kommen trotz ihrer scheinbaren Einfachheit eine Reihe von Verhältnissen in Betracht, die, wenigstens wenn sie Täuschungen des Augenmaßes ergeben, eine bestimmte Deutung erschweren, Verhältnisse, die sogleich im voraus zu bezeichnen nützlich sein wird. Zunächst ist zu beachten, daß auch in dieser Hinsicht eine proportionierte Tiefenwahrnehmung durch Täuschungen bez. der absoluten Entfernung zu einer objektiv unrichtigen werden kann. So haben z. B. Punkte, die in gleichem Abstande vor und hinter dem Fixationspunkt liegen, eine positive und negative Parallaxe, die keineswegs in konstanter sondern in einer je nach der Entfernung des Fixationspunktes wechselnden Beziehung stehen. Demgemäß wird denn auch, wenn bei der Aufgabe, zwei solche Strecken gleich zu machen, ein Fehler bemerkt wird, auch jedesmal an eine Täuschung bez. der Entfernung des Fixationspunktes selbst gedacht werden müssen. Sodann ist zu beachten, daß, wenn man solche Versuche in gewöhnlicher Weise mit frei beweglichem Blick ausführen läßt, jede Strecke beliebig wechselnd in zahlreichen Modalitäten wahrgenommen wird. Es ist jedenfalls nicht selbstverständlich, daß die Größenbeziehungen hiervon unabhängig allemal dieselben sein müssen. Ja nicht einmal das wird als ganz sicher gelten dürfen, daß jeder Punkt, wenn er fixiert wird, in eben der Entfernung gesehen wird, die ihm zuvor, bei Fixation eines anderen Punktes, nach Maßgabe seiner Querdisparation und der scheinbaren Entfernung dieses früheren Fixationspunktes, zukam; und es könnte gerade hierdurch unter Umständen ein wechselndes Erscheinen der Tiefenerstreckungen bei wechselnder Fixation herbeigeführt werden. Man übersieht, daß durch alle diese Umstände es in hohem Maße erschwert wird, für etwaige

Augenmaßtäuschungen eine bestimmte Deutung zu geben. Von einer genaueren Diskussion dieser Verhältnisse darf angesichts des geringen zurzeit vorliegenden Beobachtungsmaterials einstweilen abgesehen werden.

Die Herstellung möglichst einfacher und präziser Versuchsbedingungen ist in den Beobachtungen von Aal[1] angestrebt worden, der bei genau festgehaltener Fixation zwei in der Medianebene hintereinander gelegene und aneinanderstoßende Tiefenerstreckungen auf gleichen Betrag einzustellen suchte. Er gelangte hierbei zu dem Resultat, daß im allgemeinen „die subjektive Schätzung um einen Wert herum schwankt, welcher der objektiv richtigen Distanz gleichkommt".

Was die oben schon erwähnten Versuche von Issel anlangt, so sind diese mit frei beweglichem Blick ausgeführt worden. Sie haben gewisse regelmäßige Augenmaßtäuschungen zwar erkennen lassen, doch sind diese von relativ geringem Betrage; und insbesondere, wo es sich um die Vergleichung einer nahen und einer entfernten Tiefenstrecke handelt, wird die Vermutung, daß es sich um Täuschungen über die Entfernung des jeweiligen Fixationspunktes handelt, jedenfalls nicht abzuweisen sein.

Gleichfalls mit bewegtem Blick sind die Beobachtungen von Hillebrand[2] angestellt worden, bei denen eine größere Anzahl von Objekten in bestimmter Weise der Tiefe nach hintereinander geordnet wurden. Wir kommen auf diese Versuche, da die Anordnung nicht direkt nach Maßgabe der Tiefenabstände, sondern nach der scheinbaren absoluten Größe bewirkt wurden, erst weiter unten ausführlicher zu sprechen. Doch sei hier sogleich angeführt, daß unter gewissen dort zu erwähnenden Voraussetzungen die Ergebnisse in der Tat zu gunsten einer relativ richtigen (proportionierten) Tiefenlokalisation zu sprechen scheinen.

Man kann nach alle dem meines Erachtens zurzeit nur sagen, daß die mehrerwähnte Annahme, derzufolge die Abhängigkeit der Tiefeneindrücke von der scheinbaren Entfernung des Fixationspunktes und den jeweiligen Parallaxen (Querdisparationen) eine den objektiven Verhältnissen annähernd entsprechende sein würde, mit den zurzeit bekannten Tatsachen wohl vereinbar ist; irgendwelche bestimmte Abweichungen von einem solchen Zusammenhange haben sich bisher nicht mit Sicherheit feststellen lassen. Sie wird sich daher als Anhalt und Grundlage der Betrachtung am meisten empfehlen, ohne freilich in strengem Sinne erwiesen oder auch nur erweisbar zu sein.

Ein von dem objektiv richtigen abweichender Zusammenhang ist vermutungsweise von Sterneck[3] in Betracht gezogen worden, der die Annahme erörtert, daß der eben merkliche, d. h. der einer eben merklichen Parallaxe entsprechende Zuwachs scheinbarer Entfernung überall dem Werte der scheinbaren Entfernung, zu dem er hinzukommt, proportional sei, eine Annahme, die Sterneck wegen ihrer Analogie zum Fechnerschen psychophysischen Gesetze plausibel findet. Beobachtungen, die diese Abhängigkeit im Vergleich zu der oben erwähnten wahrscheinlicher machten, liegen nicht vor. Es erscheint mir aber auch nicht angängig, in ihr ein Analogon des psychophysischen Gesetzes erblicken zu wollen.

Bei der Entwickelung dieses Gesetzes wurde ja gerade von der ganz entgegengesetzten Anschauung ausgegangen, daß die eben merklichen Unterschiede überall als

[1] Zeitschr. f. Psychologie. 1. Abt. XLIX. S. 197.
[2] Denkschriften der Wiener Akademie. Math. naturw. Kl. LXXII. 1902.
[3] Der Sehraum auf Grund der Erfahrung. Leipzig 1907.

gleich große bewertet würden. Nun hat sich ja zweifellos herausgestellt, daß dies sehr vielfach in keiner Weise zutrifft (auch auf dem hier in Rede stehenden Gebiete der Tiefenerstreckungen kann davon sicher keine Rede sein). Allein, daß die eben merklichen Unterschiede mit einem Betrage bewertet würden, der dem schon vorhandenen, zu dem sie hinzukommen, proportional wäre (was, sofern das Webersche Gesetz gilt, auf eine objektiv richtige Bewertung hinauslaufen würde), das kann doch ebensowenig als eine allgemein zutreffende Regel anerkannt werden (es sei nur an die Schätzung übermerklicher Unterschiede bei Helligkeiten erinnert).

Es sei bei diesem Anlaß bemerkt, daß es m. E. wohl auf einem Mißverständnis oder einem Irrtum beruhen muß, wenn Sterneck (a. a. O.) sagt, er könne sich in keinem Falle der von Helmholtz vertretenen Anschauung anschließen, daß die eben merklichen Tiefenunterschiede überall mit dem gleichen Betrage bewertet würden. Sicher ist dies die Meinung von Helmholtz nicht gewesen. Die analoge Annahme bezüglich frontaler Erstreckungen hat Helmholtz sogar in ausführlicher Darstellung als durchaus unangängig abgelehnt.

In engem Zusammenhange mit dem Augenmaß für Entfernungen steht ohne Zweifel auch das für die absolute Größe der gesehenen Gegenstände. Erzeugt irgendein Gegenstand ein Netzhautbild von bestimmter Größe, wird er unter einem bestimmten Winkel gesehen, so macht er uns im allgemeinen den Eindruck einer bedeutenderen absoluten Größe, wenn wir ihn in großer, als wenn wir ihn in geringer Entfernung wahrnehmen, gleichgültig, welche Umstände diesen Entfernungseindruck bestimmen. Es unterliegt also keinem Zweifel, daß zwischen Entfernungs- und absolutem Größeneindruck ein im allgemeinen den objektiven Verhältnissen entsprechender Zusammenhang besteht. Demgemäß wird dann auch sehr häufig der Grund für Größentäuschungen in gewissen den Entfernungseindruck bestimmenden Umständen und den durch sie hervorgerufenen Entfernungstäuschungen zu suchen sein.

Allein wir dürfen uns, wie hier zuvörderst betont werden muß, jenen Zusammenhang, wenn auch über seine Existenz kein Zweifel bestehen kann, doch nicht als einen zu einfachen und festen vorstellen. Insbesondere wäre es irrtümlich als selbstverständlich anzunehmen, daß er den objektiven mathematischen Beziehungen zwischen Entfernung, absoluter Größe und Sehwinkel vollkommen entspreche, daß z. B., wenn von zwei Gegenständen, die unter gleichem Gesichtswinkel gesehen werden, der eine uns den Eindruck macht, doppelt so weit als der andere entfernt zu sein, er auch notwendig doppelt so groß wie jener oder seine Hälfte ihm gleich groß erscheinen werde. Wir müssen vielmehr, entsprechend dem, was schon an anderer Stelle berührt wurde und später noch eingehender darzulegen ist, betonen, daß die diese unmittelbaren Eindrücke bestimmenden physiologischen Vorgänge keineswegs den objektiv gegebenen und uns intellektuell bekannten Beziehungen streng zu entsprechen brauchen.

Daß sie dies in der Tat nicht immer tun, macht sich schon bei der ersten Gruppe der hier zu erwähnenden Erscheinungen geltend. Wenn man ein Auge verdeckt und mit dem anderen einen beliebigen Gegenstand betrachtet, so bemerkt man leicht, daß dessen scheinbare Größe mit Wechseln des Akkommodationszustandes sich ändert. Jede Anstrengung der Akkommodation ist mit einer scheinbaren Verkleinerung, jedes Nachlassen mit einer scheinbaren Vergrößerung verknüpft. Die nächstliegende Erklärung der lange bekannten und leicht zu beobachtenden Erscheinung wäre die, daß zufolge der Nahe-

akkommodation der Gegenstand in einer eben diesem Akkommodationszustande entsprechenden geringeren Entfernung und demzufolge, bei ungeänderter Winkelgröße, in geringerer absoluter Größe gesehen würde. Allein wie schon DONDERS[1] mit Recht als bemerkenswert hervorhebt, ist dies tatsächlich nicht der Fall. Der Gegenstand scheint bei Akkommodationsanstrengung kleiner zu werden, keineswegs aber zugleich sich anzunähern, sondern im Gegenteil in die Entfernung zu rücken. Bei gleichbleibendem Gesichtswinkel sehen wir hier also scheinbare Größe und scheinbare Entfernung sich im entgegengesetzten Sinne ändern. Man wird den Grund des theoretisch gewiß sehr beachtenswerten Phänomens wohl nur darin finden können, daß der Größeneindruck in irgend einer Weise direkt durch die physiologischen Vorgänge beeinflußt wird, die mit der Akkommodationsanstrengung verknüpft sind, nicht aber unter Vermittelung des Entfernungseindruckes.[2] Wir werden später unter diesem Gesichtspunkte auf die Erscheinung zurückzukommen haben.

In nahem Zusammenhange mit der erwähnten Tatsache stehen ohne Zweifel die unter mehr oder weniger abnormen Bedingungen auftretenden, von den Augenärzten viel studierten, als Mikropsie und Makropsie bezeichneten Sehstörungen. Mikropsie ist insbesondere als Begleiterscheinung einer unvollkommenen Akkommodationslähmung bekannt (Parese-Mikropsie), während bei vollständiger Aufhebung des Akkommodationsvermögens die Erscheinung fehlen soll (KOSTER[3]). Starke Anstrengung der Akkommodation bewirkt nach SCHIRMER[4] namentlich bei Presbyopen Mikropsie. Es ist wohl naheliegend, anzunehmen, daß auch in solchen Fällen die alsdann besonders hochgradige Anstrengung der Akkommodation die Ursache der Mikropsie sei.

Auch einige weitere unter besonderen Bedingungen gemachte Beobachtungen lassen sich ungezwungen auf der gleichen Grundlage erklären, so z. B. der folgende von REDDINGIUS[5] beschriebene Versuch.

„Wenn ich vor beide Augen konvexe Gläser von 6 D stelle, so ist es mir möglich, eine Distanz zu finden, in welcher sowohl monokulares als binokulares einfaches und scharfes Sehen durch die Zentren der Gläser möglich ist. Es zeigt sich mir da, daß beim Abschließen von einem der Augen die bestehende Makropsie sehr deutlich vermehrt wird, welche Vermehrung natürlich nicht durch eine Netzhautbildvergrößerung zu erklären ist.“

Man muß, um diesen Versuch zu verstehen, sich vergegenwärtigen, daß die binokulare Fixation eine Konvergenz und damit eine Akkommodationsanstrengung bedingt, die zufolge der starken Sammellinse für das deutliche Sehen nicht förderlich, sondern nachteilig ist und für die daher bei einäugiger Betrachtung kein Anlaß vorliegt. Ohne Zweifel wird daher bei Verdeckung des einen Auges dieses sich sogleich auswärts drehen und zugleich die Akkommodation nachlassen, womit denn in der bekannten Weise eine scheinbare Vergrößerung eintritt. Der hier angegebene Versuch findet sein genaues Gegenstück in einem von BUROW[6] angegebenen. Dieser beschreibt die Erscheinung, die eintritt, wenn die deckende Hand fortgenommen wird. Das

---

[1] Archiv f. Ophth. XVII (2). S. 27. 1871.

[2] Übrigens entzieht es sich selbstverständlich der Beurteilung, ob es der Akkommodationsvorgang selbst oder die ihn regelmäßig begleitende Konvergenzanstrengung ist, die hierbei maßgebend in Betracht kommt.

[3] KOSTER, Archiv f. Ophth. XLII (3). S. 134. 1896.

[4] SCHIRMER, Realenzyklopädie der ges. Heilkunde. XII. S 486.

[5] REDDINGIUS, Das sensomotorische Sehwerkzeug. Leipzig 1898. S. 122.

[6] BUROW, Archiv f. Ophth. XIII. (2) 1867. S. 327.

vorher gedeckte Auge war auf den anderseitig fixierten Gegenstand nicht eingestellt; im Augenblick der Aufdeckung findet daher eine Konvergenzbewegung statt und diese ist von einer scheinbaren Verkleinerung der Sehobjekte begleitet.

Die vorhin schon kurz erwähnte Untersuchung HILLEBRANDS[1] betrifft die Verhältnisse des absoluten Größeneindruckes unter Bedingungen von der Art, daß (bei möglichstem Ausschluß der sogen. empirischen Momente) lediglich das binokulare Sehen für Entfernungs- und Größeneindruck bestimmend sein sollte. Sein Verfahren ist das folgende.

Wir ordnen auf zwei vom Beobachter fort in die Entfernung laufenden parallelen und horizontalen Linien eine größere Anzahl senkrechter Stäbe an (ähnlich den Bäumen einer Allee); wir stellen sie so, daß je einer der rechten und einer der linken Seite sich genau gegenüberstehen. Die Stäbe bilden somit eine größere Anzahl vom Beobachter weiter und weiter entfernter Paare, deren jedes aus zwei in derselben Frontalebene gelegenen und um immer denselben Betrag (die Alleebreite) voneinander abstehenden Stäben besteht. In bekannter Weise sieht man unter diesen Umständen „die Allee" gegen die Entfernung hin verjüngt. HILLEBRAND stellte sich nun die Aufgabe, die Anordnung solcher Stäbe in der Weise zu modifizieren, daß diese scheinbare Verjüngung fortfiel, der Abstand der sich gegenüberstehenden Stäbe also für die nahen und die entfernten Paare gleich erschien. Wie selbstverständlich mußten zu diesem Zwecke die Stäbe nicht auf parallelen Geraden angeordnet werden, sondern auf gekrümmten Linien, deren gegenseitiger Abstand mit der Entfernung vom Beobachter zunahm. Diese (im Wege des Experimentes ermittelten) Kurven werden von HILLEBRAND als Alleekurven bezeichnet. Er gelangte nun zu dem mit bemerkenswerter Regelmäßigkeit sich herausstellenden Resultat, daß (für einen Beobachter und eine Versuchsreihe) für je zwei aufeinanderfolgende Paare die Differenz des Sehwinkels, unter dem sie erschienen, zu der Differenz der binokularen Parallaxen in konstantem Verhältnis stand.

Bezeichnen wir die Werte der zur Erzeugung eines gleichen absoluten Größeneindruckes erforderlichen Sehwinkel (HILLEBRANDS Breitenwinkel) mit W, die binokularen Parallaxen mit p, so lehrt also die Erfahrung, daß $W - W_1 = \alpha(p - p_1)$ oder $dW = \alpha dp$ und $W = c + \alpha p$, wo c irgendeinen von Null verschiedenen Wert besitzen muß.[2]

Einen direkten Aufschluß über die scheinbaren Entfernungen können wir (dem vorhin Gesagten entsprechend) den Versuchen nicht entnehmen. Es ist jedoch nicht ohne Interesse sich klar zu machen, wie diese scheinbaren Entfernungen sein müßten, wenn zwischen ihnen und den Größeneindrücken der einfache den objektiven Verhältnissen entsprechende Zusammenhang stattfände. Wäre dies der Fall (und wir wollen für den Augenblick einmal diese Annahme

[1] Denkschriften der Wiener Akademie. Math.-naturw. Kl. 72. 1902.

[2] Das Verschwinden von c würde die Beziehung $W = \alpha p$ ergeben, somit eine direkte Proportionalität der Breitenwinkel mit der Parallaxe oder eine umgekehrte mit den Entfernungen; dies würde einen geradlinig parallelen Verlauf der Alleekurven anzeigen, somit das Fehlen eben der Täuschung, die den Ausgangspunkt der Beobachtungen bildete. Nehmen wir an, daß die obige Regel bis zu beliebigen Entfernungen gültig bleibt, so müßte der zur Erzeugung des gleichen Größeneindruckes erforderliche Breitenwinkel sich mit zunehmender Entfernung einem nicht unterschreitbaren Minimalwert nähern, dessen Betrag eben jene Konstante c darstellt.

machen, so müßte der zur Erzeugung des gleichen Größeneindruckes erforderliche Breitenwinkel der scheinbaren Entfernung umgekehrt proportional, also $W = \frac{\beta}{E'}$ sein, wo E' die scheinbare Entfernung bedeutet, β eine Konstante, auf die sogleich noch zurückzukommen ist.

Wir erhalten somit

$$E' = \frac{\beta}{W} = \frac{\beta}{c + \alpha p},$$

eine Beziehung, deren genauere Betrachtung nicht ohne Interesse ist. Da

$$c + \alpha p = \frac{\beta}{E'}$$

und somit

$$\alpha\, d p = -\beta \frac{d E'}{E'^2}$$

oder

$$d E' = -\frac{\alpha}{\beta} E'^2 d p$$

ist, so ist zunächst ersichtlich, daß die Zunahme der scheinbaren Entfernung, die einer bestimmten kleinen Verminderung der Parallaxe entspricht, keine konstante ist, sondern (ganz in Übereinstimmung mit den objektiven Verhältnissen) mit zunehmender Entfernung oder abnehmender Parallaxe immer größer wird, und zwar dem Quadrat der scheinbaren Entfernung proportional wächst.

Was die in diese Formel eingehende Konstante β anlangt, so müßten wir, um sie zu bestimmen, für irgendein Fadenpaar oder irgendeinen bestimmten Wert p die scheinbare Entfernung kennen. Eine sichere Ermittelung dieser Art ist natürlich ausgeschlossen; die Beobachtungen gestatten, uns die sämtlichen scheinbaren Entfernungen in irgendeinem Verhältnis kleiner oder größer zu denken. Indessen haben wir keinen Anlaß, in dieser Hinsicht gröbere Täuschungen anzunehmen. Vielmehr kann als wahrscheinlich gelten, daß für nahe Gegenstände, wo die Werte von p beträchtlich und c klein im Vergleiche zu αp ist, die scheinbare Entfernung mit der wahren annähernd übereinstimmt. Da nun die wahre Entfernung $E = \frac{2a}{p}$ ist, wenn wir, wie oben mit $2a$ den Augenabstand bezeichnen, so werden wir den Koeffizienten $\frac{\beta}{\alpha}$ annähernd $= 2a$ setzen können und erhalten

$$E' = \frac{2a}{\frac{c}{\alpha} + p}.$$

Der Vergleich dieses Wertes mit dem der wahren Entfernungen macht ersichtlich, daß die scheinbaren für nahe Gegenstände, wo p groß im Verhältnis zu $\frac{c}{\alpha}$ ist, den wahren nahe kommen, um mit zunehmender Entfernung mehr und mehr hinter jenen zurückzubleiben. Nehmen wir wiederum an, daß die Regel unbegrenzte Gültigkeit besitzt, so stellte der Wert $\frac{2a \cdot \alpha}{c}$ die endliche Maximal-

entfernung dar, in der die Gegenstände gesehen werden, deren Parallaxe gleich Null ist.

Hervorzuheben ist dann weiter, daß eine Entfernungswahrnehmung, wie sie sich hier herausstellt, von der Art ist, wie wir sie oben als eine relativ richtige (proportionierte) bezeichnet haben.

Denn wie unmittelbar ersichtlich, unterscheiden sich die reziproken Werte der scheinbaren Entfernungen von denjenigen der wahren durchgängig um denselben additiv hinzugefügten Betrag $\frac{c}{a \cdot 2a}$, so daß, wenn wir für zwei beliebige Paare die scheinbaren Entfernungen mit E'_m und E'_n, die wahren mit E_m und E_n bezeichnen, allgemein

$$\frac{1}{E_m'} - \frac{1}{E_n'} = \frac{1}{E_m} - \frac{1}{E_n}$$

ist, wie wir es oben als Kriterium der proportionierten Tiefenwahrnehmung erhalten hatten. Man kann daher die ganze Täuschung, die hier in bezug auf die Tiefenwahrnehmung stattfindet, dahin zusammenfassen, daß bei der scheinbaren Anordnung der Gegenstände alle absolute Parallaxen um denselben Betrag gegenüber den wahren vermehrt sind.

Daß sich die scheinbaren Entfernungen in der Tat annähernd in dieser Weise verhalten, darf wohl mit einiger Wahrscheinlichkeit vermutet werden. Allerdings sind wir, wie nochmals hervorgehoben sei, nicht berechtigt, es aus den Hillebrandschen Versuchen als selbstverständliche Folgerung abzuleiten; und ob eine direkt auf die Vergleichung der Entfernungen gerichtete Untersuchung ganz das gleiche Ergebnis liefern würde, läßt sich nicht ohne weiteres im voraus sagen.[1]

Im Anschluß an diese Verhältnisse des Augenmaßes für binokular wahrgenommene Tiefen oder Tiefenunterschiede müssen wir noch eine Frage kurz berühren, die eines gewissen theoretischen Interesses nicht ermangelt und, wie an späterer Stelle zu zeigen sein wird, auch nicht ohne praktische Bedeutung ist. Wenn unsere Entfernungseindrücke, ganz allgemein gesprochen, teils durch die Verhältnisse des binokularen Sehens, teils aber durch empirische Momente mannigfaltiger Art bestimmt werden, so kann erwogen werden, welcher Art denn des genaueren dieses Zusammenwirken ist und wie weit es geht, und wir kommen damit auf Fragen, deren Beantwortung zum Teil wenigstens keineswegs selbstverständlich ist. Als ganz sicher kann zunächst nur gelten, daß die empirischen Momente da ins Spiel kommen, wo die binokularen Verhältnisse ganz ausscheiden; so beim einäugigen Sehen, ebenso mit bezug auf sehr entfernte Gegenstände, deren Parallaxe nicht merklich von Null verschieden ist. Beim Betrachten naher Gegenstände werden sie sicher insofern in Betracht kommen, daß sie (es sei nur an den Verlauf der Umrisse erinnert) das richtige Verständnis verwickelter Gegenstände erleichtern und somit zu den Bedingungen gehören, von

---

[1] Ich habe hier die Verhältnisse der scheinbaren Entfernung aus den Hillebrandschen Beobachtungen entwickelt auf Grund derjenigen Annahme über den Zusammenhang von scheinbarer Entfernung und absolutem Größeneindruck, die, wenn überhaupt ein solcher Zusammenhang als ein fester und allgemeiner angenommen wird, jedenfalls die einzig mögliche ist. Ob die hier gezogenen Folgerungen mit den Anschauungen des Autors übereinstimmen, muß hier dahingestellt bleiben, da mich seine, mir nicht überall ganz verständliche Darstellung darüber im Zweifel gelassen hat.

denen die binokulare Tiefenwahrnehmung abhängt. Man kann nun aber fragen, ob und wie weit die binokularen Tiefenwahrnehmungen in quantitativer Beziehung durch empirische Momente mitbestimmt und eventuell modifiziert werden können.

Für gewisse Fälle muß diese Möglichkeit wohl jedenfalls anerkannt werden. Fixieren wir z. B. einen Gegenstand in mäßiger Entfernung, so werden die Einzelheiten eines entfernten Hintergrundes in erster Linie zufolge der binokularen Verhältnisse hinter jenem in größerem Abstande gesehen. Dies schließt nicht aus, daß der Entfernungseindruck, den wir erhalten, sich des genaueren durch andere Momente, wie Luftperspektive, bestimmen kann. Für gewisse Fälle wird also ein Zusammenwirken der einen und anderen Verhältnisse in der hier erwogenen Weise wohl nicht bestritten werden können.

Einen weiteren Aufschluß über diese Verhältnisse können wir erwarten, wenn wir Bedingungen herstellen, unter denen die empirischen Momente mit den binokular gesehenen Tiefen in starken Widerspruch kommen. Dies ist z. B. der Fall, wenn wir Photographien stereoskopisch vereinigen, die in ungeeigneter Weise (mit zu kleiner oder zu großer Basis) aufgenommen sind. Die Erfahrungen, die man unter solchen Umständen macht, lehren, daß oft wohl die Verhältnisse des binokularen Sehens maßgebend genug sind, um uns trotz mancher empirischer Hilfsmittel die Gegenstände unrichtig, deformiert erscheinen zu lassen; häufig aber werden doch auch derartige Unrichtigkeiten nicht bemerkt und die Gegenstände wohl richtig wahrgenommen. Im ganzen darf daher wohl angenommen werden, daß ein Zusammenwirken der empirischen Momente und des Binokularsehens in dem bezeichneten Sinne oder eine Beeinflussung der quantitativen Verhältnisse des letzteren durch die ersteren jedenfalls unter Umständen stattfinden kann. In welchem Umfange indessen derartiges eintritt, läßt sich zur Zeit kaum mit Sicherheit beurteilen, auch ist es wahrscheinlich, daß individuelle Unterschiede hier von großer Bedeutung sind.

10. Das hier erwähnte zuerst von ROLLMAN angegebene und benutzte Prinzip hat in neuerer Zeit eine umfangreiche Verwendung gefunden in denjenigen Apparaten und Bildern, die unter den wenig glücklichen Namen der Anaglyphen, Stereographen, Plastographen usw. in den Handel gebracht worden sind. Das bei diesen benutzte Verfahren stellt zu dem im Text von HELMHOLTZ angegebenen gewissermaßen das Gegenstück dar. Die Zeichnungen sind hier auf weißem Grunde ausgeführt; das Prinzip, nach dem rechtes und linkes Auge vermöge farbiger Gläser verschiedene Bilder sehen, ist in diesem Falle nicht minder leicht verständlich. Führt man auf weißem Grunde eine Zeichnung mit roter Farbe aus, so wird diese annähernd unsichtbar, wenn man sie durch ein rotes Glas betrachtet, da alsdann der Grund gleichfalls rot gefärbt erscheint. Das Verschwinden ist um so vollkommener, je ähnlicher die beiden Farben sind;[1] und man gelangt durch passende Wahl der Gläser leicht dahin, daß das Bild, für sich allein betrachtet, zwar noch sichtbar, aber doch schwach genug ist, um auf den Gesamteindruck keinen merkbaren Einfluß zu gewinnen. Durch ein grünes Glas gesehen ist dagegen die rote Zeichnung deutlich sichtbar; es erscheint der Grund nunmehr grün, die Zeichnung annähernd schwarz, da das von den roten Teilen zurückgeworfene Licht größtenteils in

[1] Es ist nicht schwierig, jedoch ohne besonderes Interesse, die Bedingungen für ein genaues Verschwinden streng physikalisch zu formulieren.

dem grünen Glase absorbiert wird. Entsprechend ist eine grüne Zeichnung auf weißem Grunde durch ein rotes Glas deutlich wahrnehmbar, während sie durch ein grünes gesehen nahezu unmerklich wird. Will man es also erreichen, daß dieselbe Zeichnung dem rechten und linken Auge als verschiedenes Bild erscheint, so muß man, wenn das rechte Auge mit einem roten, das linke mit einem grünen Glase versehen ist, das was das rechte Auge sehen soll, grün, das was das linke sehen soll, rot, und das, was beide sehen sollen, schwarz ausführen. Demgemäß sind in diesen Zeichnungen nahe Gegenstände durch dunkle Flächen dargestellt, über die links ein grüner und rechts ein roter Rand übersteht, während bei den entfernten dies umgekehrt ist.[1]

Der Hauptvorzug des Verfahrens gegenüber allen, die sich getrennter Bilder bedienen, liegt, abgesehen von seiner Einfachheit, darin, daß die tatsächliche Vereinigung derselben das binokulare Fixieren zusammengehöriger Punkte ungemein erleichtert. Hierdurch gelingt die stereoskopische Vereinigung der Bilder ungeübten Personen und solchen, bei denen der binokulare Sehakt durch irgendwelche Umstände erschwert ist, im allgemeinen besser und leichter als bei den anderen Methoden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß das Verfahren auch für Demonstrationszwecke in objektiver Form verwertbar ist, indem Bilder der angegebenen Art projiziert und von einer größeren Zahl von Personen, deren jede eine doppelfarbige Brille benutzt, gleichzeitig betrachtet werden können. Solche zur Projektion geeignete Bilder wurden zuerst auf Anregung HERINGS[2] von den Zeisswerken hergestellt. Seit einigen Jahren werden sie von der Firma SKLADANOWSKI[3] für mäßigen Preis und in ganz befriedigender Ausführung in den Handel gebracht.

11. Anhangsweise soll hier noch die Abhängigkeit der binokularen Tiefenwahrnehmung von einigen besonderen Bedingungen besprochen werden. In erster Linie darf hier die Tatsache hervorgehoben werden, daß der binokulare Tiefeneindruck keineswegs an eine Verschmelzung der beiden einäugigen Bilder zu einem einheitlichen Eindruck geknüpft ist, sondern auch bei der deutlichen Wahrnehmung getrennter Doppelbilder sehr wohl stattfinden kann. Die Richtigkeit dieser von HELMHOLTZ schon gemachten Angabe[4] kann durch die dort angeführten Tatsachen als sichergestellt gelten; entsprechende Beobachtungen sind später noch vielfach gemacht worden. In den Versuchen von F. AUERBACH und mir[5] über die zur binokularen Erkennung von Tiefenverhältnissen erforderliche Zeit wird hervorgehoben (S. 344), daß der vor oder hinter dem Fixationspunkt überspringende elektrische Funke in deutlich getrennten Doppelbildern gesehen, aber vollkommen sicher und richtig hinsichtlich der Entfernung

[1] Übrigens ist nicht die von HELMHOLTZ im Text angegebene entgegengesetzte Verfahrungsweise (farbige Zeichnungen auf schwarzem Grunde), sondern die hier beschriebene auch diejenige, deren sich der Erfinder des ganzen Verfahrens, ROLLMANN, bedient hat. Die HELMHOLTZsche Darstellung beruht in diesem Punkt auf einem Versehen.

[2] PFLÜGERS Archiv. LXXXVII. 1901. S. 229.

[3] SKLADANOWSKI, Plastische Weltbilder. Berlin 1903.

[4] Die uns hier beschäftigende Tatsache ist die nämliche, die HELMHOLTZ, unter etwas anderem Gesichtspunkte, an späterer Stelle erwähnt. Es handelt sich dort um die Entfernung, in der (bei deutlicher Diplopie) die Halbbilder gesehen werden, und es wird hervorgehoben, daß sie im allgemeinen in der richtigen Entfernung des betreffenden Gegenstandes erscheinen. Dies ist, wie man sieht, das gleiche, was wir hier von den Bedingungen der binokularen Tiefenwahrnehmung ausgehend, in etwas anderer Formulierung aussprechen.

[5] Archiv für Physiologie 1877. S. 297.

lokalisiert wurde. Tschermak und Höfer[1] haben die wohlbekannte Tatsache nochmals konstatiert und auch gezeigt, daß die Tiefenlokalisation auf Grund von Doppelbildern einen nicht unbeträchtlichen Grad von Feinheit besitzt (es mußte eine bewegliche Nadel auf den gleichen Abstand vom Fixierpunkt eingestellt werden wie eine Musternadel). Lag der Fixierpunkt in 2 m Entfernung vom Beobachter, die Musternadel 40 bis 80 cm, so konnte die bewegliche mit Fehlern von wenigen Zentimetern auf die gleiche Entfernung gebracht werden.

Als selbstverständlich darf freilich gelten, daß, wie überall, das Zustandekommen der Tiefeneindrücke an besondere Bedingungen geknüpft ist, auf denen das Zusammenwirken zweier ganz bestimmter Netzhautstellen in dieser Beziehung beruht. Diese Bedingungen (die durch eine gewisse Ähnlichkeit der beiden Bilder keineswegs erschöpft sind) werden bei der gewöhnlichen Betrachtung körperlicher oder in verschiedener Entfernung befindlicher Gegenstände wohl immer erfüllt sein. Wenn wir dagegen bei Einrichtungen von der Art des Stereoskops beiden Augen beliebig verschieden gestaltete Bilder vorlegen, so ist, wie das stereoskopische Sehen überhaupt, so auch die Entstehung des Tiefeneindruckes bei erheblich getrennten Doppelbildern von mancherlei besonderen und nicht genau zu fixierenden Umständen abhängig. Versuche über diese Verhältnisse sind von Heine[2] angestellt worden. Daß, wie er findet, die Verschmelzung im allgemeinen um so schwerer zustande kommt, je weiter die Doppelbilder auseinander liegen, wird nicht zu bezweifeln sein. In dem oben erwähnten Versuch Tschermaks war die Distanz der Doppelbilder stets nur gering; sie belief sich, wie sich aus seinen Angaben berechnet, äußersten Falles noch nicht auf 2°.

Von W. A. Nagel[3] ist untersucht worden, ob die Fähigkeit der binokularen Tiefenwahrnehmung an Helligkeitsgrade gebunden ist, die die Unterscheidung von Farben gestatten oder auch bei geringeren Lichtstärken möglich ist, eine Frage, die eine besondere Wichtigkeit gewinnt, wenn wir, der Duplizitätstheorie gemäß, annehmen, daß beim Sehen in schwachem Licht (unterhalb der Farbenschwelle) ein gewisser Teil des Sehorgans allein funktioniert. Die Untersuchung ergab, daß auch unter den Bedingungen des Dämmerungssehens binokulare Tiefenwahrnehmung stattfindet, mit einer Genauigkeit, wie sie der unter diesen Umständen gegebenen Sehschärfe entspricht, die ja hinter der des Tagessehens auch erheblich zurückbleibt.

Guilloz[4] gelang es, stereoskopische Effekte durch Vereinigung von Nachbildern zu erzielen.

Als eine Stereoskopie durch Vermittelung von Erinnerungsbildern hat Ewald[5] einen hübschen Versuch beschrieben, der darin besteht, daß mittels rotierender Einrichtungen die stereoskopisch zu vereinigenden Bilder dem rechten und linken Auge abwechselnd sichtbar gemacht werden. Um die Einmischung der Nachbilder auszuschließen, wurde dabei, während das Bild

---

[1] Tschermak und Höfer, Über binokulare Tiefenwahrnehmung auf Grund von Doppelbildern. Pflügers Archiv XCVIII. 1903. S. 299.

[2] Heine, Pflügers Archiv CIV. 1904. S. 316

[3] Nagel, Stereoskopie und Tiefenwahrnehmung im Dämmerungssehen. Zeitschr. für Psychol. XXVII.

[4] Guilloz, *Sur la stéréoscopie obtenue par les visions consécutives d'images monoculaires. C. R. de la société de biol.* 1904. S. 1053.

[5] Ewald, Pflügers Archiv CXV. 1906. S. 514

dem rechten Auge sichtbar war, das Gesichtsfeld des anderen nicht verdunkelt, sondern in ihm ein heller, das Nachbild überwiegender (auslöschender) Fleck dargeboten. Auch bei diesem Verfahren gelang die richtige stereoskopische Wahrnehmung.

Endlich sei hier angeführt, daß es dem ebengenannten Forscher gelang, pseudoskopische Effekte in weit größerem Umfange zu erzielen, als sie zunächst erhalten werden können. Wie HELMHOLTZ angibt, gelingt eine Umkehrung der Tiefenverhältnisse nur bei Gegenständen, die auch bei dieser Umgestaltung eine nicht gänzlich aus dem Rahmen aller Erfahrung herausfallende, sondern einigermaßen „wahrscheinliche" Gestalt erhalten. Man kann es, wie EWALD an sich beobachtete, durch systematische Übung dahin bringen, auch andere stereoskopische Bilder in verkehrter Weise zu vereinigen, wobei denn sehr seltsame und abenteuerliche Gebilde gesehen werden, und man gewinnt auch in dieser Richtung allmählich eine immer größere Leichtigkeit und Sicherheit. K.

---

§ 31. Das binokulare Doppeltsehen.

Wir haben bisher die Erscheinungen des zweiäugigen Sehens betrachtet, insofern sie sinnliche Zeichen für eine bestimmte Lage der gesehenen Raumobjekte sind. Es bleibt noch übrig die subjektiven Erscheinungen, die sich hierbei zeigen, zu untersuchen.

Ich habe oben auseinandergesetzt, wie im monokularen Sehen neben der Anschauung der wirklichen Verteilung der Objekte nach den drei Dimensionen des Raumes sich, wenn man auf die Art, wie sie gesehen werden, achtet, die Anschauung ihrer Verteilung in dem flächenhaften Gesichtsfelde ausbildet. Wenn nun mit zwei Augen gesehen wird, so erscheinen die Gegenstände in dem Sehfelde jedes Auges, aber da die Bilder in beiden Sehfeldern, wie wir schon gesehen haben, im allgemeinen nicht gleich sind, so können sie sich im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde auch nicht absolut decken, sondern es bleiben gewisse Ungleichheiten beider Sehfelder bestehen und werden wahrgenommen. In diesem Kapitel sollen die Erscheinungen betrachtet werden, welche von der Ungleichheit der räumlichen Verhältnisse der Bilder beider Sehfelder herrühren, im nächsten die, welche von der ungleichen Beleuchtung oder Färbung der Sehfelder oder ihrer Teile verursacht werden.

Es ist wohl zu beachten, daß diese Betrachtungsweise des Gesichtsfeldes als solchen, nicht die natürliche und zuerst erworbene Art des Wahrnehmens ist, sondern vielmehr stets erst durch bewußte Reflexion auf die Beschaffenheit unserer Gesichtseindrücke veranlaßt wird. Wir betrachten dann nicht mehr die Welt der Objekte an sich, wie sie *ist*, sondern wir beobachten, wie sie uns von unserem dermaligen Standpunkte aus *erscheint*. Es ist dann wesentlich die Erscheinung, die uns interessiert, entweder weil wir sie als Zeichner nachbilden, oder als Physiologen theoretisch untersuchen wollen.

So wie wir nun im zweiäugigen Sehen anfangen das Gesichtsfeld als solches zu untersuchen, bemerken wir, daß die Ordnung der Objekte in den beiden Sehfeldern nicht übereinstimmt. Indem wir z. B. durch das Fenster nach den Bäumen draußen sehen, sind wir imstande das Laubwerk mit dem linken Auge noch etwas weiter nach rechts hin zu verfolgen, als mit dem rechten. Wir

sehen mit jenem Auge am rechten Rande des Fensters noch Teile des Laubwerks, die wir mit dem rechten nicht sehen können, welche für das rechte durch den Rahmen des Fensters verdeckt sind. Wir sehen also den Rahmen des Fensters in den beiden Gesichtsfeldern an zwei verschiedene Teile der Laubmasse angrenzen.

Ebenso verdeckt das Fensterkreuz dem rechten Auge einen anderen Teil der Laubwand, als dem linken. Indem wir also der Laubwand mit dem Blicke folgen, tritt uns zweimal das Fensterkreuz an zwei verschiedenen Stellen entgegen, die Laubwand, wenn auch unvollständig verdeckend. Das Fensterkreuz erscheint also in zwei Stellen des Gesichtsfeldes, es erscheint doppelt.

Wenn man dagegen den Blick auf das Fensterkreuz oder die Glasscheiben richtet und ihn entlang wandern läßt über die kleinen Flecken der einen Scheibe, dann über den mittleren vertikalen Balken des Kreuzes, dann über die andere Scheibe, so kann es kommen, daß ein Baumstamm, der im Gesichtsfelde des rechten Auges rechts neben und hinter dem vertikalen Holze erscheint, für das linke Auge links daneben liegt. Also wird auch das fernere Objekt in der durchlaufenden Reihenfolge der betrachteten Punkte zweimal vorkommen und doppelt erscheinen.

Wir haben im Paragraphen 28 gesehen, daß wir die Reihenfolge der Punkte im Gesichtsfelde nicht bloß durch wirkliche Bewegung bestimmen können, sondern sie auch lernen nach der Reihenfolge ihrer nebeneinander liegenden Netzhautbilder im Auge zu beurteilen. Wir brauchen also auch nicht den Blick wirklich über das Gesichtsfeld hingehen zu lassen, um die Doppelbilder zu sehen, sondern können dauernd einen Punkt fixieren und doch die verschiedene Anordnung der Objekte in beiden Sehfeldern erkennen. Wenn dasselbe Objekt entweder auf verschiedenen Seiten des fixierten Punktes erscheint, oder aber die Größe und Richtung seines Abstandes vom Fixationspunkte in hinreichend auffallender Weise verschieden ist, wird man erkennen, daß das betreffende Objekt in zwei verschiedene Stellen des Gesichtsfeldes eingeordnet erscheint.

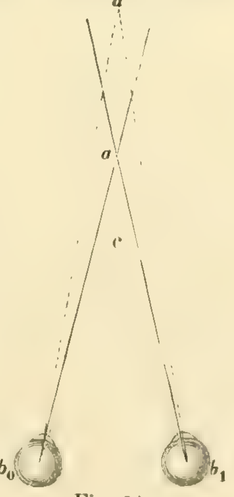


Fig. 64.

Es seien in Fig. 64 b_0 und b_1 die beiden Augen, welche den Punkt a fixieren, der ihnen demnach einfach an seinem wahren Orte im Raume erscheint. Der Punkt c, welcher näher als a ist, wird dem Auge b_0 rechts von dem Punkte a im Gesichtsfelde erscheinen müssen, da c rechts von der Gesichtslinie ab_0 liegt. Dem Auge b_1 erscheint aber c links von a zu liegen. Also kommt es im gemeinsamen Gesichtsfelde einmal rechts, einmal links von a vor, erscheint also doppelt und zwar in sogen. ungleichnamigen Doppelbildern, da das scheinbar rechts liegende Bild von a dem linken Auge, das scheinbar links liegende dem rechten Auge angehört.

Umgekehrt ist es mit dem entfernter liegenden Punkte d. Er erscheint im Gesichtsfelde des rechten Auges b_1 rechts neben a, in dem des linken Auges links neben a, folglich in gleichnamigen Doppelbildern.

Ein etwas anderer Fall ist der in Fig. 65 dargestellte; b_0 und b_1 sind wieder die Augen, a der gemeinsame Fixationspunkt. Der Punkt c liege außerhalb des Winkels b_0ab_1, in geringerem Abstande von den Augen als der Fixa-

tionspunkt. Diesmal liegt c allerdings in den Gesichtsfeldern beider Augen nach links von a, weil die Richtungslinien cb_0 und cb_1 beide nach links bzw. von ab_0 und ab_1 liegen. Aber der Winkel cb_0a ist viel kleiner als der Winkel cb_1a. Im Gesichtsfelde von b_0 ist also c um einen viel kleineren Winkel von a entfernt, als im Gesichtsfelde des anderen Auges. Ist diese Differenz merklich genug, so erscheint das Bild wieder an zwei verschiedenen Orten des gemeinsamen Gesichtsfeldes, also doppelt. Die Doppelbilder sind aber in diesem Falle nicht so deutlich, als wenn sie auf verschiedenen Seiten des Fixationspunktes liegen, wie in Fig. 64. Namentlich wenn sie sich mehr von a entfernen und in die Seitenteile des Gesichtsfeldes zu liegen kommen, muß ihr Abstand und der Unterschied ihrer Helligkeit von der der Umgebung schon ziemlich bedeutend sein, wenn sie bemerkt werden sollen. Etwas deutlicher werden sie, wenn sich zur Seite von a, etwa gleich weit von den Augen abstehend wie a, ein scharf bezeichnetes Objekt f zwischen den verlängerten Schenkeln des Winkels b_0cb_1 befindet, so daß im gemeinsamen Gesichtsfelde die Doppelbilder von c auf verschiedenen Seiten von f liegen. Man hat dann im Gesichtsfelde des Auges b_0 die scheinbare Reihenfolge acf, in dem von b_1 die Folge afc. Dann ist es leichter die Trennung der Bilder zu erkennen, als wenn man sie vor einem gleichmäßig gefärbten und erleuchteten Hintergrund sieht.



Fig. 65.

Endlich kann man auch Doppelbilder sehen, wenn die Bilder desselben Punktes in den Gesichtsfeldern beider Augen zwar gleiche Distanz von dem fixierten Punkte haben, aber hinreichend verschiedene Richtung, daß deren Unterschied auffällig genug ist.

Dies ist der Fall, wenn der Punkt c höher oder tiefer und gleichzeitig den Augen ein wenig näher als der Punkt a gelegen ist.

Wir sehen also diejenigen Objektpunkte im allgemeinen doppelt, welche in beiden Sehfeldern hinreichend verschiedene scheinbare Lage beziehlich zum Blickpunkte haben, daß diese Verschiedenheit durch die Schätzung des Augenmaßes bemerkt werden kann. Solche Objekte dagegen, welche scheinbar gleiche Lage gegen den Fixationspunkt im Sehfelde haben, sehen wir einfach.

Ich will ein von beiden Augen als einfach gesehenes Bild ein Ganzbild nennen, die zwei Bilder zusammengenommen, welche von demselben Objekte entworfen werden, welches nicht einfach gesehen wird, ein Doppelbild, jedes einzelne der letzteren dagegen ein Halbbild.

Wir haben nun näher zu untersuchen, welche Punkte beider Sehfelder scheinbar gleiche Lage zum Fixationspunkte haben und also im gemeinsamen Gesichtsfelde sich decken. Ich nenne solche Punkte Deckpunkte oder korrespondierende Punkte; man hat sie auch, einer besonderen theoretischen Auffassung zuliebe, identische Punkte genannt. Da jedem Punkte jedes Sehfeldes ein Netzhautpunkt entspricht, so kann man auch von Deckpunkten, korrespondierenden oder identischen Punkten der beiden Netzhäute reden. Punkte, welche einander nicht korrespondieren, nenne ich mit Fechner disparat.

1. Die Blickpunkte der beiden Sehfelder normaler Augen sind Deckpunkte. Der Blickpunkt jedes Sehfeldes entspricht der anatomisch aus-

gezeichneten Stelle der Netzhaut, der Mitte der *Fovea centralis*, der Stelle des deutlichsten Sehens. Der Blickpunkt ist der fixierte Punkt des Gesichtsfeldes. Mit dem ausgesprochenen Satze gleichgeltend ist es also auch zu sagen, der fixierte Punkt des vor uns liegenden Raumes werde stets einfach gesehen, und ein Objektpunkt, der sich auf den beiden Zentren der Netzhautgruben abbilde, werde einfach gesehen.

Es ist dies ein Satz, der sich bei allen Beobachtungen normaler Augen bestätigt; von gewissen Fällen des Schielens, wo er Ausnahmen erleidet, werden wir unten handeln.

Wenn wir nach dem Grunde dieses Verhaltens fragen, so kommen wir auf die viel besprochene Frage, warum wir mit zwei Augen doch einfach sehen. Wenn man die Sinnesempfindungen einfach als Zeichen ansieht, deren Deutung erlernt werden muß, so bietet die Beantwortung keine besondere Schwierigkeit. Fast alle äußeren Objekte affizieren gleichzeitig verschiedene Nervenfasern unseres Körpers und bringen zusammengesetzte Sinnesempfindungen hervor, die wir in ihrer Zusammensetzung als das gegebene sinnliche Zeichen des betreffenden Objekts auffassen lernen, ohne uns der Zusammensetzung dieses Zeichens selbst bewußt zu werden. Im Gegenteil lernen wir die zusammengesetzte Beschaffenheit der Empfindung in den bei weitem meisten Fällen dieser Art erst durch wissenschaftliche Analyse kennen. Die Empfindung einer bestimmten Klangfarbe ist zusammengesetzt aus einer Mehrzahl von Empfindungen vieler einfacher Töne; einen Stift, den wir in der Hand halten, fühlen wir mit zwei Fingern und also durch zwei Gruppen getrennter Nervenfasern, wir riechen denselben Geruch mit zwei Nasenhöhlen, das scheinbar einfache Gefühl des Nassen, welches ein berührter Körper erzeugt, ist aus dem des Glatten und des Kalten zusammengesetzt usw. In der Tat ist kein Grund, aus einer komplizierten Wirkung auf ein so kompliziertes Reagens, wie unser Körper ist, auf ein entsprechend kompliziertes Objekt zu schließen.

Es wird also im allgemeinen durchaus von der Erfahrung abhängen, ob eine häufig wiederkehrende Gruppe von Empfindungen als das sinnliche Zeichen eines oder mehrerer Objekte von uns kennen gelernt wird.

Berücksichtigen wir nun, daß der normale Gebrauch der Augen derjenige ist, wobei wir das Objekt, welches unsere Aufmerksamkeit zurzeit fesselt, mit beiden Augen fixieren, also auf den Zentren der beiden Netzhautgruben abbilden, mit denen wir es am genausten sehen können, so ergibt sich daraus, daß die beiden Zentra der Netzhautgruben immer Bilder desselben einen äußeren Objekts abbilden werden, dessen Einheit übrigens durch den Tastsinn, so oft als nötig, zu konstatieren ist, und daß ihre Empfindungen daher in räumlicher Beziehung immer als gleichgeltend kennen gelernt werden. Wir sehen also einfach mit beiden Blickpunkten, weil beim natürlichen normalen Gebrauche der Augen auf beiden Netzhautgruben immer dasselbe Objekt abgebildet ist, von dessen nur einmaligem Vorhandensein wir durch den Tastsinn unterrichtet sind oder uns unterrichten können.

Die entgegengesetzte Ansicht dagegen, wonach gewisse Empfindungen unseres Körpers schon vor aller Erfahrung gewisse Raumvorstellungen hervorzurufen imstande sind, muß annehmen, daß die beiden Netzhautzentra ebenso, wie jedes andere Paar zusammengehöriger Deckstellen beider Netzhäute, durch einen angeborenen Mechanismus identische Raumanschauungen geben. Dies war auch

der Grund, aus welchem die Deckstellen der Netzhäute zuerst als identische Stellen bezeichnet wurden. Eine kritische Vergleichung beider Ansichten läßt sich erst am Schlusse des folgenden Paragraphen geben.

Bei vielen Fällen sogen. konkomitierenden Schielens finden sich Ausnahmen von dem Gesetze, daß die Netzhautgruben Deckstellen sind, namentlich bei solchen Individuen, deren beide Augen annähernd gleich gut brauchbar zum Sehen sind. Bei der genannten Art des Schielens können beide Augen nicht parallel gerichtet werden, sondern stehen entweder konvergent oder divergent, und zwar so, daß bei allen Richtungen der Gesichtslinien der Winkel der Konvergenz oder Divergenz nahehin die gleiche Größe behält. Hat ein Auge eine beträchtlich größere Sehschärfe, als das andere, so pflegt der Kranke die Objekte nur mit dem besseren Auge zu fixieren, und nur wenn man dieses mit der Hand bedeckt, fixiert er sie mit dem anderen Auge. Sind beide Augen von ziemlich gleicher Sehschärfe, so ist das Schielen alternierend, d. h. der Patient braucht zum Fixieren bald das eine, bald das andere Auge, beurteilt übrigens mit beiden Augen die Richtung der gesehenen Gegenstände richtig. In der Mehrzahl dieser letzteren Fälle nun zeigt es sich, daß die beiden Fixationspunkte nicht mehr Deckstellen sind, sondern dem Zentrum der Netzhautgrube des einen Auges eine andere, je nach der Richtung des Schielens mehr nach innen oder außen gelegene Stelle der anderen Netzhaut korrespondiert. Der Schielende sieht alsdann einfach trotz der falschen Stellung seiner Augen. Der Nachweis, daß er wirklich mit beiden Augen sieht, und nicht etwa bloß das eine Bild vernachlässigt, wie man sonst anzunehmen pflegte, kann geführt werden, wenn man vor eines seiner Augen ein Prisma mit der brechenden Kante nach oben oder unten gekehrt bringt. Er sieht dann, wie ein Normalsichtiger, zwei übereinanderstehende Doppelbilder des Objekts. Durch das Prisma wird nämlich das Bild des einen Auges nach oben verschoben, und bei einer solchen Trennung des binokularen Ganzbildes in übereinanderstehende Halbbilder kann man leicht und sicher erkennen, ob beide Halbbilder gesehen werden, und ob das eine oder das andere mehr nach rechts oder links steht. Ebenso treten Doppelbilder auf, wenn man vor das eine Auge ein Prisma mit der brechenden Kante nach links oder rechts gekehrt hält, wodurch das eine Halbbild seitlich verschoben wird, selbst wenn das Prisma so gewählt und so gehalten ist, daß nun Bilder des gleichen Objekts auf die beiden Netzhautzentra fallen. Auch wenn dergleichen Patienten noch fähig sind, durch besondere Anstrengung die Augen in parallele Stellung zu bringen, wo sie entfernte Objekte einfach sehen sollten, sehen sie diese doppelt.

Dasselbe geschieht nun auch, wenn durch eine gelungene Operation den Augen die normale Stellung wiedergegeben ist. Die Patienten werden dann in den ersten Tagen von den Doppelbildern sehr gequält, später lernen sie diese zu übersehen, bis dann endlich, nach einem Jahre oder längerer Zeit, sich das normale Identitätsverhältnis hergestellt findet. Doch geschieht das letztere nicht in allen Fällen, namentlich nicht in solchen, wo das eine Auge eine erheblich geringere Sehschärfe hat, als das andere; in solchen bleiben meist die nach der Operation auftretenden Doppelbilder in unveränderter Stellung zueinander bestehen, aber das undeutlichere wird bei der Orientierung vernachlässigt. Endlich kommen auch Fälle vor, wo diese Vernachlässigung des einen Bildes so weit geht, daß es selbst mit Hilfe von Prismen und farbigen Gläsern nicht zur Wahrnehmung gebracht werden kann.

Ebenso wie bei geringer Sehschärfe des einen Auges die Patienten nach der Operation sich von den Doppelbildern leichter befreien durch Vernachlässigung des einen, als durch Ausbildung eines neuen Identitätsverhältnisses, so bildet sich auch bei Schielenden mit einem schlecht sehenden Auge weniger leicht die beschriebene Inkongruenz der Netzhäute aus. Bei solchen zeigen sich dann selbst nach jahrelangem Schielen noch immer die beiden Netzhautzentra als korrespondierend. Dasselbe ist der Fall in allen denjenigen Fällen, wo der Konvergenz-, beziehlich Divergenzwinkel, den die Blicklinien miteinander bilden, veränderlich ist, entweder bei verschiedener Richtung des Sehens oder periodisch wechselnd zu verschiedenen Zeiten, weil in solchen Fällen die Bilder, welche die Netzhautgrube des einen Auges treffen, auf sehr verschiedene Stellen der anderen Netzhaut fallen und sich deshalb keine feste Gewöhnung der Zusammengehörigkeit ausbilden kann.[1]

Auch zeigte sich in der Tat bei Schielenden, deren eines Auge verminderte Sehschärfe hat, daß sie beim Vorhalten eines roten Glases vor ein Auge Doppelbilder bald sehen, bald plötzlich wieder nicht sehen, ohne daß sich die Stellung des Auges geändert hat, oder daß sie nach der Operation das farbige Halbbild bald rechts, bald wieder links von dem ungefärbten Bilde sehen, oder gar nicht zu sagen wissen, ob es rechts oder links sei. Bei einem solchen Auge, dessen Bilder wegen ihrer Unvollkommenheit wenig beachtet werden, bleibt, wie es scheint, die Orientierung überhaupt immer eine unsichere, und die Erinnerung an das vor dem Schielen vorhanden gewesene Identitätsverhältnis kämpft gleichsam mit dem neuen, was sich nicht recht sicher und bestimmt ausbilden kann. Alfred Graefe bemerkt mit Recht, daß hier gerade das Schwanken der Aussagen charakteristisch für den Vorgang sei.*

2. Die Netzhauthorizonte beider Augen korrespondieren einander. Ich habe oben auf Seite 38, Bd. III die Netzhauthorizonte für normalsichtige Augen definiert als diejenigen Meridiane beider Augen, welche bei paralleler Richtung derselben in der Primärstellung mit der Visierebene zusammenfallen, und schon angeführt, daß diese miteinander korrespondieren. Bei kurzsichtigen Augen ist das meist nicht der Fall, und ich habe oben schon vorgeschlagen, als Netzhauthorizonte diejenigen Meridiane zu betrachten, welche in die Visierebene fallen bei einer solchen Stellung der Augen, wo eine Reihe Deckstellen beider Netzhäute in der genannten Ebene liegt. Dies wird für kurzsichtige Augen meist eine etwas nach abwärts gerichtete Konvergenzstellung sein. Dann würde

[1] Der Nachweis, daß viele Schielende mit beiden Augen und doch einfach sehen, wurde geliefert von Pickford in Roser und Wunderlichs Archiv für physiologische Heilkunde, 1842, S. 590. Die ersten Fälle von Inkongruenz beschrieben durch Albrecht v. Graefe im Archiv für Ophthalmologie. I, 1, 234; darüber auch Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig 1861. S. 130—135. Die Resultate aus einer größeren Zahl von Beobachtungen gibt Alfred Graefe im Archiv für Ophthalmologie, XI, 2, S. 1—46. Ferner F. C. Donders im Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, Bd. III, S. 357 und 358; *Anomalies of accommodation and refr.*, p. 164—166. Es sind dies Beobachtungen von fundamentaler Wichtigkeit für die Theorie des Binokolarsehens, und wäre eine möglichst häufige und genaue Wiederholung derselben zu wünschen.

* Das Sehen der Schielenden, insbesondere auch die durch Operationen herbeigeführten Änderungen desselben sind in neuerer Zeit sehr eingehend untersucht worden. Da es hier geboten ist, die große Fülle hierhergehöriger Tatsachen unter ganz bestimmten theoretischen Gesichtspunkten zu betrachten, so ziehe ich vor, diese Verhältnisse im Schlußkapitel zu besprechen. K.

der oben hingestellte Satz nur Konsequenz der Definition des Begriffs „Netzhauthorizont" sein. Es ist aber noch zu bemerken, daß die Netzhauthorizonte auch dadurch ausgezeichnet sind, daß bei der Lage des Fixationspunktes in der Medianebene für das Augenmaß ihre Ebenen in der Visierebene zu liegen scheinen.

Genaue Bestimmungen über die Lage der Netzhauthorizonte sind von VOLKMANN für seine (etwas kurzsichtigen) Augen gegeben worden.[1] An einer ebenen, vor den Augen befindlichen senkrechten Wand waren zwei Drehscheiben so angebracht, daß der Drehpunkt einer jeden in der optischen Achse des bezüglichen, auf die unendliche Ferne gerichteten Auges lag. Auf jeder Scheibe war eine feine Linie verzeichnet, die entweder einen Durchmesser oder einen Radius bildete und mit der Umdrehung der Scheibe ihre Lage veränderte. Die Größe der Drehung konnte mittels einer am Rande der Scheiben angebrachten Gradteilung gemessen werden.

1. Versuchsreihe: Links ein Durchmesser horizontal gestellt; der Durchmesser der rechten Scheibe wurde gesucht ihm parallel zu stellen. Um die Linien getrennt zu sehen, war es nötig, den Kopf ein wenig nach der Seite zu neigen. Im Mittel aus 30 Versuchen betrug

der Kreuzungswinkel . . . . 0,443°
der wahrscheinliche Beobachtungsfehler . . . 0,08°.

2. Versuchsreihe: Der rechte Durchmesser war horizontal gestellt, der linke wurde ihm parallel gestellt; sonst ebenso,

Kreuzungswinkel . . . . 0,553°
wahrscheinlicher Fehler . . . . . 0,11°.

3. Versuchsreihe: Der linke Durchmesser liegt horizontal, der rechte wird so eingestellt, daß er beim Decken mit ihm eine möglichst feine Linie darstellt. Wieder im Mittel aus 30 Versuchen

Kreuzungswinkel . . . . 0,397°
wahrscheinlicher Fehler . . . . . 0,13°.

4. Versuchsreihe: Ebenso, nur ist der rechte Durchmesser festgestellt, der linke wird bewegt,

Kreuzungswinkel . . . . 0,467°
wahrscheinlicher Fehler . . . . . 0,14°.

5. Versuchsreihe: Links ein horizontal gerichteter Radius; der Radius der rechten Scheibe wird so gestellt, daß er mit jenem eine gerade Linie zu bilden scheint. Im Mittel aus 30 Versuchen

Kreuzungswinkel . . . . 0,46°
wahrscheinlicher Fehler . . . . . 0,125°.

6. Versuchsreihe: Ebenso, nur liegt der rechte Radius fest, der linke wird gestellt,

Kreuzungswinkel . . . . 0,463°
wahrscheinlicher Fehler . . . . . 0,096°.

---

[1] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1864. Heft 2. S. 206—208.

Man sieht, daß diese Versuche alle nahe übereinstimmende Resultate geben, nämlich

1.	0,443°
2.	0,553
3.	0,397
4.	0,467
5.	0,460
6.	0,463
Mittel:	0,464°

Der Sinn dieser Abweichung ist ein solcher, daß die äußere Seite jedes Netzhauthorizontes etwas tiefer liegt, als die innere.

7. Versuchsreihe: Endlich hat VOLKMANN noch Versuche angestellt, bei denen er nur eine Scheibe mit dem linken Auge betrachtete und den darauf gezeichneten Durchmesser horizontal zu stellen suchte; dabei stellte er im Mittel von 30 Versuchen das linke Ende um 0,203° zu tief.

8. Versuchsreihe: Ebenso, nur wurde das rechte Auge gebraucht. Das rechte Ende des Durchmessers wurde um 0,233° zu tief gestellt.

Die Summe beider Abweichungen 0,203° + 0,233° = 0,436° entspricht hinreichend genau dem oben gefundenen Kreuzungswinkel der Netzhauthorizonte.

Nach den Methoden der ersten vier Versuchsreihen fand VOLKMANN bei einigen anderen Beobachtern den Kreuzungswinkel der Netzhauthorizonte, wie folgt:

Professor H. WELCKER	0,72°
Stud. med. KÄHERL	0,26
Dr. SCHWEIGGER-SEIDEL	0,43.

Bei meinen eigenen Augen habe ich Versuche nach der Methode von VOLKMANNS 5. und 6. Reihe angestellt und finde keine merkliche Abweichung der Netzhauthorizonte, wenn ich vorher nur ferne Gegenstände angeblickt, oder durch längere Fortsetzung der Versuche meine Gesichtslinien parallel erhalten habe. Komme ich aber vom Lesen oder Schreiben, wobei meine Augen also konvergierten, so finde ich eine kleine Abweichung in demselben Sinne, wie VOLKMANN, und von wechselnder Größe, die bei längerer Fortsetzung der Versuche wieder verschwindet.

Herr Dr. DASTICH, dessen linkes Auge normalsichtig, das rechte kurzsichtig ist, fand eine Abweichung von 0,31°.

Was nun die vermutliche Entstehungsweise dieses Identitätsverhältnisses der horizontalen Meridiane betrifft, so müssen wir beachten, daß wir bei Fixation eines bestimmten Objektpunktes in denjenigen beiden Meridianen der Sehfelder und der Netzhäute, welche mit der Visierebene zusammenfallen, immer eine Reihe von Bildern derselben Objektpunkte finden werden, wie auch übrigens die Schnittlinie der Visierebene mit der Oberfläche des Objekts verlaufen möge. Für alle andere Meridiane dagegen wird das Verhältnis, je nach der Lage und Form des Objekts sehr wechseln. Geht zum Beispiel durch den Fixationspunkt eine gerade senkrechte Linie, so werden deren Bilder in die senkrechten Meridiane der Sehfelder und auf die entsprechenden Netzhautpunkte fallen. Ist die gesehene Linie oben gegen den Beobachter hingeneigt, so fallen ihre Bilder in

zwei nach oben konvergierende Meridiane der Sehfelder; entfernt sie sich dagegen nach oben hin von dem Beobachter, so wird sie in zwei nach oben divergierenden Meridianen erscheinen. So ist es also mit Ausnahme der in der Visierebene gelegenen Meridiane für jeden anderen Meridian je eines Auges von Form und Lage des gesehenen Objekts abhängig, welcher Meridian des anderen Auges die Bilder der auf jenem abgebildeten Objektpunkte empfängt. Nur die in der Visierebene liegenden Meridiane enthalten entsprechende Bilder unabhängig von der Form und Lage der Objekte.

Nun können allerdings bei verschiedenen Richtungen der Augen verschiedene Netzhautmeridiane in die Visierebene fallen. Wir dürfen aber wohl voraussetzen, daß bei natürlicher Lebensweise des Menschen, wenn nicht zu anhaltend einseitige Beschäftigungen mit bestimmter Haltung des Körpers und der Augen eingeschlagen werden, die Augen sich überwiegend oft in oder nahe der Primärlage befinden, und daß also diejenigen Netzhautmeridiane, die in der Primärstellung der Augen mit der Visierebene zusammenfallen — das sind aber die Netzhauthorizonte —, unter allen anderen am häufigsten entsprechende Bilder empfangen und daher für sie die Gewöhnung gleicher Raumprojektion sich ausbildet.

Überwiegende Beschäftigung mit nahen Gegenständen, die mit nach unten gerichteten konvergierenden Blicken betrachtet werden, würde dagegen das Auftreten einer solchen Abweichung, wie sie Volkmann an sich und anderen beobachtet hat, bedingen können, denn bei einer solchen Richtung des Blickes rücken wirklich seine Netzhauthorizonte in die Visierebene.

3. Die zu den Netzhauthorizonten scheinbar vertikalen Meridiane decken sich. Es ist schon oben auf Seite 144 B. III hervorgehoben worden, daß diejenigen Meridiane der Sehfelder, welche für das Augenmaß einen scheinbar richtigen rechten Winkel mit den Netzhauthorizonten bilden, in Wahrheit mit ihrem oberen Ende etwas nach außen geneigt sind. Liegen also die Netzhauthorizonte in der Visierebene, so divergieren die scheinbar vertikalen Meridiane etwas nach oben und konvergieren nach unten. Diese selben scheinbar vertikalen Meridiane, welche also in den beiden Sehfeldern scheinbar dieselbe Lage gegen den Fixationspunkt und Netzhauthorizont haben, zeigen sich als korrespondierend in dem binokularen Gesichtsfelde.

Den Kreuzungswinkel der korrespondierenden scheinbaren Vertikallinien kann man nach denselben Methoden finden, wie den der Netzhauthorizonte, ausgenommen diejenige, wobei die Linien zum Decken gebracht werden. Dabei verschmelzen nämlich zwei einander ähnlich gefärbte Linien zu leicht zu einem stereoskopischen Gesamtbilde, selbst wenn sie noch ziemlich disparate Richtungen haben. Man kann dies aber vermeiden, wenn man den beiden Linien ganz verschiedene Färbung gibt, zum Beispiel einen weißen Faden auf schwarzem Grund mit einem schwarzen auf weißem kombiniert. Die sichersten und übereinstimmendsten Urteile bei solchen Vergleichungen habe ich schließlich bei folgender Methode gewonnen.

An einer senkrechten hölzernen Tafel wird ein Blatt schwarzen Papiers ausgespannt und auf diesem nebeneinander befestigt erstens ein roter 3 mm breiter und von zwei parallelen geraden Rändern begrenzter Papierstreifen, und zweitens ein blauer Faden. Beide erhalten nahehin senkrechte Richtung, nach oben ein wenig divergierend, und solche Entfernung voneinander, daß ihr Abstand in der Höhe der Augen des Beobachters dem Abstande dieser Augen

gleich ist. Der Papierstreifen wird mit beiden Enden festgesteckt, der Faden mit dem oberen Ende; sein unteres ist durch ein kleines Gewicht gespannt. Das untere Ende des Fadens schiebt man so viel, als nötig, mit einer Nadel zur Seite, die man schließlich fest sticht, wenn der Faden die richtige Lage hat. Man blickt nun nach dem Faden und Streifen mit parallelen Gesichtslinien, so daß der blaue Faden auf der Mitte des roten Streifens erscheint, und verschiebt den Faden so lange, bis er in seiner ganzen Länge genau auf der Mitte des Streifens zu liegen scheint. Dann steckt man die Nadel fest. Indem man die Entfernung des Fadens vom Streifen am oberen und unteren Ende abmißt, und auch den vertikalen Abstand der gemessenen Punkte, kann man den Winkel, den ihre Richtungen machen, leicht bestimmen.

Der obige Satz ergibt sich am direktesten, wenn man in der beschriebenen Weise die Abweichung der horizontalen und vertikalen Decklinien bestimmt und außerdem die Winkel, welche die zu einer Horizontallinie scheinbar normal gerichteten Linien mit jener machen. Solche Bestimmungen hat Herr Dr. Dastich in meinem Laboratorium ausgeführt und folgende Werte gefunden:

Winkel zwischen den scheinbar vertikalen Decklinien:	$2^0\,40'$
Winkel zwischen den Netzhauthorizonten:	$0^0\,18'$
Differenz:	$2^0\,22'$.

Derselbe fand die Abweichung vom rechten Winkel

für sein rechtes Auge	$1^0\,12'$
für sein linkes Auge	$1^0\,21'$
Summe:	$2^0\,33'$.

Die Differenz der ersten beiden Winkel, im Betrag von $2^0\,22'$, ist der Winkel, den die scheinbar vertikalen Meridiane miteinander bilden würden bei einer Stellung der Augen, wo die Netzhauthorizonte in die Visierebene fallen. Sie ist der Summe $2^0\,33'$ so nahe gleich, als die Genauigkeit solcher Versuche erwarten läßt. Das heißt also, die scheinbar vertikalen Decklinien unterscheiden sich nicht merklich von denjenigen Linien, die nach dem Augenmaß normal zu den Netzhauthorizonten scheinen.

Dasselbe geht übrigens auch indirekt aus Volkmanns Versuchen hervor. Derselbe hat nämlich außer den schon erwähnten Versuchen, einen monokular gesehenen Durchmesser seiner Scheiben horizontal zu stellen (7. und 8. Versuchsreihe), auch Versuche gemacht, ihn vertikal zu stellen, wobei er also die absolut vertikale Richtung einzuhalten suchte, nicht die normale gegen eine horizontale sichtbare gerade Linie. Da indessen schon oben bemerkt ist, daß die Netzhauthorizonte ihm absolut horizontal erschienen unter den Umständen des Versuchs, so folgt, daß ihm die hier bestimmten scheinbar vertikalen Richtungen auch normal zu den Netzhauthorizonten erscheinen mußten.

9. Versuchsreihe: Die Scheibe wird mit dem linken Auge betrachtet und der Durchmesser scheinbar vertikal gestellt. Im Mittel von 30 Versuchen beträgt die Abweichung $1{,}307^0$.

10. Versuchsreihe: Ebenso mit dem rechten Auge; Abweichung im Mittel $0{,}82^0$.

Die Winkel zwischen den scheinbar vertikalen Decklinien hat er nach denselben Methoden bestimmt, wie für die horizontalen, und folgende Zahlen erhalten

Methode		Mittelwert	Wahrscheinlicher Fehler
der Versuchsreihe	1	2,23°	0,16°
„ „	2	2,06	0,07
„ „	5	2,16	0,22
„ „	6	2,14	0,21
Gesamtmittel:		2,15	

Nun ist die Summe der Abweichungen der jedem einzelnen Auge normal erscheinenden Linien:

$$1{,}307^{0} + 0{,}82 = 2{,}127$$

der Abweichung der Decklinien voneinander so nahehin gleich, daß daraus folgt, die für das Augenmaß in jedem Sehfelde vertikal erscheinenden Linien seien auch Decklinien, und dies entspricht wieder unserem Satze.

Auf Volkmanns Veranlassung wiederholte Herr Schweigger-Seidel die Versuche. Die Abweichung der scheinbar vertikalen Linie von der wirklich Vertikalen fand er für das linke Auge gleich 0,666°, für das rechte Auge gleich 0,657°. Die Summe beider Größen ist 1,32°. Damit nahe übereinstimmend fand sich der Winkel zwischen den beiden scheinbar vertikalen Decklinien bei ihm gleich 1,44°.

Volkmann hat endlich auch Versuchsreihen noch in der Weise angestellt, daß der Diameter der einen Scheibe horizontal lag und er den der anderen im binokularen Gesamtbilde senkrecht zu jenem zu stellen suchte. Auch diese Versuche zeigen gute Übereinstimmung mit den früheren und mit dem oben hingestellten Satze, daß die scheinbar vertikalen Meridiane Decklinien seien; und dieser Satz ist wieder ein Fall des oben hingestellten allgemeineren, daß Linien, die in den monokularen Sehfeldern scheinbar gleiche Lage haben, Decklinien sind. Nachdem nämlich festgestellt ist, daß die Netzhauthorizonte Decklinien sind, müssen die zu ihnen und dem Fixationspunkt scheinbar gleiche Lage habenden scheinbaren Vertikalen auch Decklinien sein.

Der Winkel der scheinbaren Vertikallinien hat bei normalsichtigen Augen, wie es scheint, immer ziemlich dieselbe Größe von etwa $2^1/_2$ Grad; bei kurzsichtigen Augen habe ich ihn meist viel kleiner gefunden. Auch E. Hering, der kurzsichtig ist, hat ihn für seine Augen beinahe gleich Null gefunden.

In den theoretischen Untersuchungen über das monokulare Gesichtsfeld fanden wir, daß die dort betrachteten Vorgänge bei der Ausbildung des Augenmaßes für diesen Winkel keine bestimmte Größe ergaben, ihn vielmehr unbestimmt ließen. Gründe, die seine Größe zu bestimmen scheinen, werden wir weiter unten in der Lehre vom Horopter finden.

4. In den scheinbar vertikalen Decklinien sind Punkte, welche gleich weit von den Netzhauthorizonten abliegen, Deckpunkte. Auch hierüber liegen genaue Versuche von Volkmann vor. Jedes Auge hatte ein rechtwinkeliges Kreuz vor sich, gebildet aus der Horizontalen *aa'*, Fig. 66, und den senkrechten *s* und *s'*, deren Abstand dem der Augen des Beobachters gleich zu machen ist. Unterhalb der Horizontallinie und nach außen von der Vertikallinie jedes Kreuzes war eine zweite Horizontallinie *b* und *b'* gezogen, von denen die eine *b* fest, die andere *b'* beweglich war, so daß sie sich selbst parallel verschoben werden konnte. Der Beobachter fixierte die Mittelpunkte beider Kreuze mit parallelen Gesichtslinien, so daß sie sich scheinbar deckten, und verschob dann die bewegliche Horizontallinie *b'* so lange, bis sie scheinbar

die genaue Fortsetzung der festen Horizontallinie b im anderen Sehfelde bildete.

Im Mittel aus je 30 Versuchen erhielt er den Abstand der beweglichen Horizontallinie:

Bewegliche Horizontale rechts . . .	5,51
Bewegliche Horizontale links	5,47
Abstand der festen Horizontale . . .	5,50.

Der Abstand der Linien von den Augen war 300 mm, die Differenzen zwischen den beiden verglichenen Größen liegen unter der Grenze der wahrnehmbaren Abstände.

Um eine feste Übung in der Vergleichung vertikaler Distanzen zwischen beiden Sehfeldern zu erlangen, sind die Verhältnisse des natürlichen Sehens

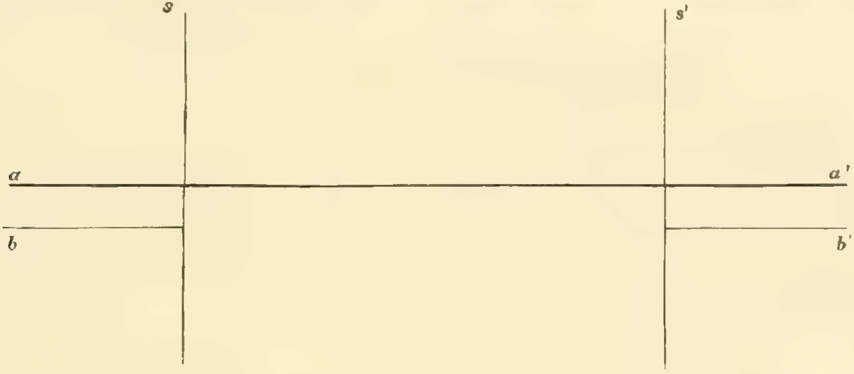


Fig. 66.

besonders günstig. So oft nämlich der Fixationspunkt in der Medianebene des Körpers liegt, der Blick also geradeaus gerichtet ist, können oberhalb und unterhalb des Fixationspunktes liegende Objektpunkte zwar beiden Augen in etwas disparaten Meridianen erscheinen, aber ihr Winkelabstand vom Fixationspunkte wird immer in beiden Sehfeldern derselbe sein müssen, auch wenn jene Punkte dem Auge beträchtlich näher oder ferner liegen, als der fixierte Punkt; und es wird deshalb, so oft wir geradeaus blicken, Gelegenheit gegeben sein, Erfahrungen zu machen, welche vertikale Dimensionen des einen Sehfeldes denen des anderen entsprechen. Dementsprechend werden wir später finden, daß vertikal übereinanderliegende Doppelbilder besonders leicht erkannt werden.

5. In den Netzhauthorizonten sind solche Punkte, welche gleich weit vom Fixationspunkt abliegen, Deckpunkte. Volkmann hat hierüber Versuchsreihen angestellt nach ähnlicher Weise wie die zuletzt erwähnten, nur daß statt der festen und beweglichen Horizontallinie rechts von der Vertikallinie jedes Kreuzes eine zweite Vertikallinie angebracht war, die eine fest oberhalb der Horizontallinie des Kreuzes, die andere beweglich darunter. Wieder im Mittel von je 30 Versuchen fand sich der Abstand der beweglichen Vertikallinie,

wenn sie rechts lag, . . .	5,24 mm
wenn sie links lag, ...	5,21 „
Abstand der festen Vertikale	5,20 „ .

Die Unterschiede sind hier also wieder kleiner, als die kleinsten wahrnehmbaren Größen. Volkmann machte also auch diese Bestimmung mit sehr großer Genauigkeit.

Ich selbst finde diese Art des Einstellens sehr viel schwerer, als die von horizontalen Linien, weil bei mir eine scheinbare stereoskopische Vereinigung der Vertikallinien des Kreuzes, welche fixiert werden sollen, eintritt, auch wenn meine Blicklinien etwas mehr konvergieren oder divergieren, als zur genauen Vereinigung nötig ist; und dabei schwanken dann die seitlichen Vertikallinien hin und her, so daß ich nach Belieben bald die eine, bald die andere der fixierten Vertikallinien näher sehen kann. Sicherer gelingt mir der Versuch, wenn auch von den fixierten Vertikallinien die eine nur oberhalb, die andere nur unterhalb der Horizontalen gezogen ist.

Die Vergleichung horizontaler Distanzen in beiden Sehfeldern kann im allgemeinen nur dann ein konstantes Resultat geben, wenn sie an unendlich entfernten Objekten, des irdischen Horizontes z. B., angestellt wird. Die Entfernung zweier Punkte des Horizontes in den Bildern beider Sehfelder muß allerdings immer die gleiche sein, und durch Vergleichung solcher Bilder werden wir lernen können, welche horizontale Strecken in beiden Sehfeldern (beziehlich auf beiden Netzhäuten) gleich groß sind. An allen näheren Gegenständen werden nur ausnahmsweise zwei horizontal nebeneinander gelegene Objektpunkte in beiden Sehfeldern unter gleichem Distanzwinkel erscheinen, wegen der Verschiedenheit ihrer perspektivischen Projektionen. Dementsprechend finden wir auch, daß horizontal nebeneinander liegende Doppelbilder viel leichter verschmelzen und schwerer als doppelt erkannt werden, als vertikal übereinander liegende. Dennoch reicht, wie Volkmanns Versuche zeigen, unter günstigen Bedingungen und bei sehr häufiger Wiederholung der Versuche die vorhandene Übung in der Vergleichung beider Sehfelder aus, um die Gleichheit oder Ungleichheit zweier solcher Distanzen ziemlich genau und richtig zu erkennen. Es kommt freilich noch hinzu, daß wegen der symmetrischen Anordnung beider Augen keine unsymmetrische Verteilung der Fehler zwischen beiden Augen eintreten kann. Wenn a und a_1 zwei gleiche Strecken in den äußeren Hälften beider Sehfelder sind, b und b_1 gleich große auf den inneren Hälften, so ist wegen der Symmetrie der Augen kein Grund vorhanden a für größer oder kleiner als a_1, und b für größer oder kleiner als b_1 zu halten. Da wir ferner durch das Augenmaß richtig erkennen, daß $a = b$, und daß $a_1 = b_1$, so werden wir auch richtig erkennen, daß die Decklinien $a = b_1$ und $b = a_1$ sind.*

Nachdem wir festgestellt haben, welche Richtungen in beiden Sehfeldern, beziehlich auf beiden Netzhäuten, als scheinbar horizontale Decklinien sich entsprechen, welche als vertikale Decklinien, welche Längen auf den ersteren und welche auf den letzteren gleich groß erscheinen, so sind die nötigen Stücke gegeben, um die scheinbare Lage aller Punkte des einen monokularen Gesichtsfeldes mit denen des anderen vergleichen zu können. Von einer genauen Vergleichung der Lage der Doppelbilder kann, wie schon oben hervorgehoben wurde, nur in den mittleren Teilen der Sehfelder die Rede sein, da an ihren peripherischen Teilen sowohl die Erkennung der Deckstellen, wie auch die Abmessung der Distanzen durch das Augenmaß zu unsicher ist. Wir werden

* Über gewisse Abweichungen von den hier aufgestellten Regeln vgl. Anm. 1 am Schluß des Paragraphen. K.

also den bei unserer vorliegenden Untersuchung in Betracht kommenden mittleren Teil jedes Sehfeldes als eine Ebene ansehen können.

Es sei in Fig. 67 o der Fixationspunkt des rechten Auges in der Fläche des Papiers, o' der des linken Auges; ak sei die scheinbare horizontale, bl die scheinbar vertikale Linie für jenes, $a'k'$ und $b'l'$ seien dieselben beiden im anderen Sehfelde. Es seien ferner $co = c'o'$ gleiche Längen auf den beiden scheinbar vertikalen Linien abgeschnitten, dann erscheinen auch beide Linien gleich lang und c und c' sind Deckpunkte. Ebenso seien $do = d'o'$ gleiche Längen auf den scheinbaren Horizontalen. Durch c denke man eine Parallele ef mit ak, durch c' ebenso eine Parallele $e'f'$ mit $a'k'$ gelegt. Jeder Punkt von f muß nicht bloß wirklich, sondern auch scheinbar gleich großen Abstand von ak haben wie c, da die Abstände von parallelen Linien durch das Augenmaß richtig und genau verglichen werden können. Ebenso muß jeder Punkt

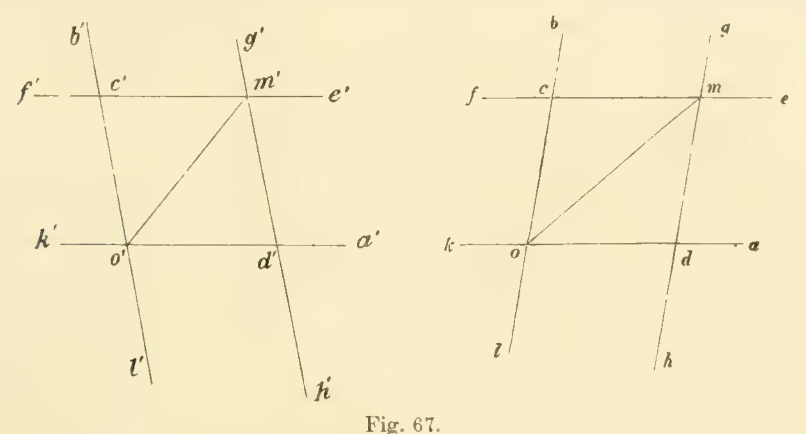


Fig. 67.

von $e'f'$ scheinbar den gleichen Abstand von $a'k'$ haben wie c', und da die scheinbaren Abstände des Punktes c von der Linie ak und des Punktes c von der Linie $a'k'$ als gleich vorausgesetzt sind, so müssen die Linien ef und $e'f'$ in beiden Sehfeldern erscheinen als Horizontallinien, die gleichen Abstand von den sich deckenden Netzhauthorizonten haben, und müssen also selbst Decklinien sein, wenn der oben vorangestellte Satz richtig ist, daß alle Punkte, welche in beiden Sehfeldern scheinbar gleiche Lage haben, Deckpunkte seien.

Ebenso folgt, daß die Linien gh und $g'h'$ Decklinien sind, und schließlich, daß die Punkte m und m', in denen sich ef mit gh und $e'f'$ mit $g'h'$ schneidet, Deckpunkte sind.

Diese Schlüsse zusammengefaßt kann man so aussprechen, daß unter Voraussetzung der Gültigkeit des mehrerwähnten Grundsatzes diejenigen Punkte beider Sehfelder Deckpunkte sind, welche gleiche und gleich gerichtete Abstände von den scheinbar horizontalen und scheinbar vertikalen Decklinien haben.

Um diesen Satz an der Erfahrung zu prüfen, kann man die stereoskopischen Figuren *D*, Taf. II, gebrauchen. Um eine zu leichte Verschmelzung korrespondierender Linien zu verhindern, ist die rechte Seite mit weißen Linien auf schwarzem Grunde, die linke mit schwarzen Linien auf weißem Grunde gezeichnet. Die Figuren sollen mit parallelen Blicklinien angesehen werden, so daß beide sich im gemeinsamen Gesichtsfelde scheinbar decken, wer dies nicht

erreichen kann, brauche das Stereoskop. Die rechte Seite bildet für mein rechtes Auge, die linke für mein linkes ein scheinbar genau rechtwinkeliges Gitter, ich hoffe, daß dies für die meisten normalsichtigen Leser der Fall sein wird. Anderenfalls muß jeder Beobachter sich ähnliche Figuren für seine Augen passend zeichnen, so daß sowohl die horizontalen wie auch die vertikalen Linien der einen Figur mit den entsprechenden der anderen denjenigen Winkel bilden, welcher nötig ist, damit sie bei paralleler Blickrichtung zur Deckung gebracht werden können. Der Abstand der Mittelpunkte beider Figuren ist gleich dem Abstande der Augenmittelpunkte des Beobachters zu machen; die Abstände der horizontalen Linien voneinander sind in beiden Figuren gleich zu machen, ebenso die Abstände der Vertikalen voneinander.

Fixiere ich nun den Mittelpunkt des rechten Gitters mit dem rechten, den des linken Gitters mit dem linken Auge, so fallen in dem gemeinschaftlichen Gesichtsfelde alle Linien des einen auf die entsprechenden des anderen, was man leicht erkennen kann, da übrigens die schwarzen Linien der linken Seite nicht leicht mit den weißen der rechten Seite verschmelzen.[1]

Der Versuch, der mit der Fig. *D*, Taf. II, ausgeführt ist, gibt uns nun auch Aufschluß darüber, wie korrespondierende Punkte in beiden Augen zu finden sind. Man richte die Gesichtslinien parallel der Medianebene auf die beiden Mittelpunkte der genannten Figuren, deren Ebene selbst senkrecht zur Gesichtslinie stehen soll, und denke sich durch die Horizontallinien der Figuren und durch die Knotenpunkte der Augen Ebenen gelegt. Diejenigen Ebenen, welche durch die mittlere Horizontallinie gehen, auf der der Fixationspunkt liegt, fallen unter diesen Umständen mit den Netzhauthorizonten beider Augen zusammen. Die anderen Ebenen schneiden sich untereinander und den Netzhauthorizont in einer zur Gesichtslinie normalen Horizontallinie, die wir die Äquatorialachse des Netzhauthorizontes nennen wollen. Den Winkel zwischen einer der beschriebenen Ebenen und dem Netzhauthorizonte nennen wir den Höhenwinkel der betreffenden Ebene. Für alle Punkte einer solchen Ebene ist die scheinbare Höhe über der Visierebene gleich, wenn wir sie auf ein unendlich entferntes Gesichtsfeld projiziert denken; dementsprechend nennen wir sie eine **Ebene gleichen Höhenwinkels**.

Ebenso denken wir uns Ebenen konstruiert durch jede der vertikalen Linien der Figuren und den Knotenpunkt des betreffenden Auges. Die mittlere derselben, welche den Fixationspunkt enthält, ist die Ebene des scheinbar vertikalen Meridians und wird von sämtlichen anderen Ebenen dieser Art in einer zur Gesichtslinie normalen Linie geschnitten, welche wir die Äquatorialachse des scheinbar vertikalen Meridians nennen. Den Winkel zwischen einer solchen Ebene und der Ebene des scheinbar vertikalen Meridians nennen wir Breitenwinkel, und zählen diesen in beiden Augen als positiv nach rechts hin, negativ nach links. Die Ebenen, welche den Breitenwinkel einschließen, selbst nennen wir **Ebenen gleichen Breitenwinkels**.

Nach Feststellung dieser Begriffe läßt sich die Lage identischer Punkte in

---

[1] Ein Beobachter, welcher durch die größere Anzahl der Linien verwirrt zu werden fürchten sollte, wie Herr E. Hering, kann die entsprechenden Beobachtungen auch leicht an einer Reihe von einfacheren Liniensystemen ausführen, wie ich es übrigens selbst auch getan habe, ehe ich mir die beschriebenen Gitter konstruiert hatte. Ich hatte nicht geglaubt dies in meinem Aufsatze über den Horopter erwähnen zu müssen, will es hier aber ausdrücklich hervorheben, da es Veranlassung zu kritischen Einwürfen gegeben hat.

beiden Sehfeldern leicht finden. Man denke sich durch den betreffenden Punkt des Gesichtsfeldes und die Äquatorialachsen sowohl des Netzhauthorizontes als auch des scheinbar vertikalen Meridians Ebenen gelegt, durch welche der Höhenwinkel und der Breitenwinkel für den betreffenden Punkt des Gesichtsfeldes gegeben wird. **Identisch sind solche Punkte beider Gesichtsfelder, welche gleiche Höhenwinkel und gleiche Breitenwinkel haben.**

Diese Definition identischer Punkte stützt sich auf einen direkt auszuführenden Versuch. Denkt man sich die beiden Figuren, welche die Einteilung des Gesichtsfeldes darstellen, zu unendlichen Ebenen erweitert, so erhält man die Abteilungen der identischen Punkte bis zu 90° auf jeder Seite der Gesichtslinie. Dies genügt auch vollkommen für diesen Zweck, denn wenn auch das Gesichtsfeld jedes einzelnen Auges nach außen etwas weiter als 90° reicht, so ist das binokulare Gesichtsfeld doch viel kleiner, weil der Nasenrücken dem anderen Auge diese äußersten Teile des Feldes verdeckt. Übrigens ist eine genaue Bestimmung der identischen Punkte durch den Versuch auch nur möglich für diejenigen Stellen beider Sehfelder, die dem Fixationspunkt ziemlich nahe liegen, denn in größerer Entfernung wird die Entscheidung darüber, welche indirekt gesehene Gegenstände beider Gesichtsfelder sich decken, welche nicht, so außerordentlich unbestimmt, daß nur ganz erhebliche Differenzen der Doppelbilder überhaupt wahrgenommen werden können.

Es ist noch zu bemerken, daß nicht auf allen korrespondierenden Meridianen der Sehfelder die Deckpunkte gleichweit vom Blickpunkte entfernt sind, wie dies von den scheinbar horizontalen und scheinbar vertikalen Decklinien gilt. Wenn man in der Fig. 67 von den Fixationspunkten o und o' die Diagonalen om und $o'm'$ nach den Deckpunkten m und m' zieht, so ist om länger als $o'm'$ und doch sind beides korrespondierende Strecken auf korrespondierenden Meridianen. Der genannte Unterschied ist klein.

Bezeichnet man die Strecken

$$md = co = m'd' = c'o' \text{ mit } a$$

und

$$mc = od = m'c' = o'd' \text{ mit } b$$

und die Abweichung der beiden Winkel cod und $c'o'k'$ von 90^0 mit ε, so sind die korrespondierenden Längen

$$mo = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab\sin\varepsilon}$$

$$m'o' = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\sin\varepsilon}\,.$$

Relativ am größten wird dieser Unterschied, wenn $a = b$; dann werden nämlich diese Längen

$$mo = 2a\cos\left(45^0 - \frac{\varepsilon}{2}\right) \quad \text{und} \quad m'o' = 2a\cos\left(45^0 + \frac{\varepsilon}{2}\right).$$

Wenn $\delta = 1^0\,13'$, wie für meine Augen, so ist das Verhältnis dieser beiden Größen wie 1 : 1,0215, oder wie 47 : 48. Um diesen Unterschied zu beobachten, habe ich das Liniensystem der Fig. 68 angewendet. Das rechte Auge fixiert a', das linke a, die Linien ac und $a'c'$ fallen dann im binokularen Bilde scheinbar in eine zusammen, ebenso ab und $a'b'$. Die Linie fg ist auf einen anderen Papierstreifen gezogen, der um den entfernten Punkt g drehbar ist. Man sucht nun, während man a und a' streng fixiert, gf so einzustellen, daß sie als

Fortsetzung der Linie *ed* erscheint. Dann fand sich, daß ich *a'f* etwa gleich 19,5 mm machte, während *ad* 20 mm betrug. Man muß natürlich gleichzeitig genau darauf achten, daß *ac* und *a'c'* als eine ununterbrochene Linie erscheinen. Der Unterschied, um den es sich hier handelt, liegt ziemlich an der Grenze des Wahrnehmbaren.

Ich finde, daß die zuletzt erwähnten Unterschiede sich auch merklich machen, wenn ich zwei Systeme konzentrischer Kreise, das linke mit schwarzen Linien auf weißem Grund gezeichnet, das rechte mit weißen Linien auf schwarzem Grunde ausgeführt, wie *O* Taf. IV, bei fester Fixation ihrer Mittelpunkte mit parallelen Gesichtslinien zum Decken bringe. Dann decken sich die weißen und schwarzen Linien wirklich in dem vertikalen und horizontalen Meridian; aber in den schräg liegenden Meridianen fallen sie nebeneinander, und zwar nach oben rechts und unten links die schwarzen nach außen, dagegen oben links und unten rechts die weißen. Der nach oben rechts gerichtete Radius

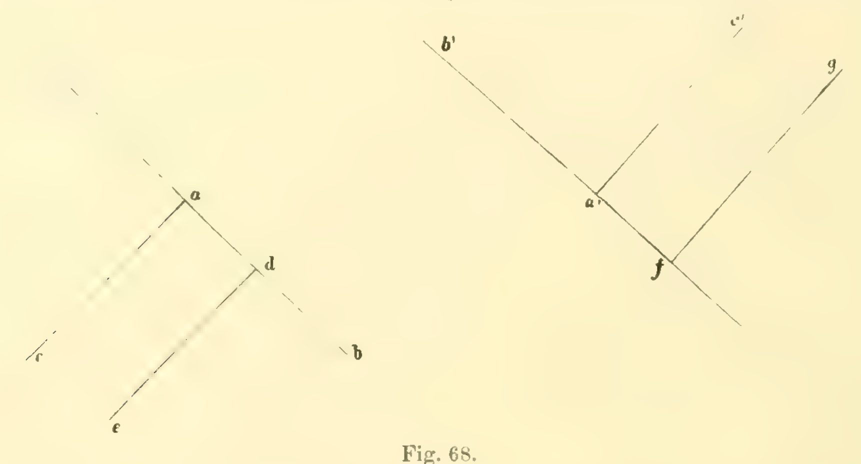


Fig. 68.

des rechten Feldes müßte nämlich länger gemacht werden, als der nach oben rechts gerichtete Radius des linken Feldes, um ihm gleich zu erscheinen. Folglich erscheint jener kürzer, dieser länger.

Es ergibt sich aus der oben hingestellten Betrachtungsweise auch ein Gesetz für die Größe derjenigen Winkel, welche verschieden gerichtete Decklinien miteinander machen. Die Berechnung, welche unten nachzusehen ist, ergibt für die Winkeldifferenz $\varDelta$ zweier korrespondierender Meridiane bei parallelen Blicklinien den Ausdruck

$$\varDelta = \gamma + 2\varepsilon \sin^2\beta,$$

worin γ der Winkel zwischen den Netzhauthorizonten in der betreffenden Augenstellung, 2ε der Winkel zwischen den scheinbar vertikalen Meridianen, und β der Mittelwert des Winkels ist, den die beiden zu vergleichenden Decklinien mit ihren Netzhauthorizonten bilden.

Eine Reihe von Messungen, welche VOLKMANN über die Winkel zwischen korrespondierenden Meridianen angestellt hat[1], machen eine Vergleichung dieser Formel mit der Erfahrung möglich. In der folgenden Tabelle sind die Kon-

[1] Versuch 100—112 im zweiten Hefte seiner physiologischen Untersuchungen im Gebiete der Optik. S. 202—213.

stanten γ und δ der obigen Formel nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den gesamten Beobachtungen bestimmt worden.

Kreuzungswinkel korrespondierender Meridiane für VOLKMANNS Augen.

Neigung gegen die Vertikale $90^\circ - \beta$	Kreuzungswinkel beobachteter Mittelwert	Kreuzungswinkel wahrscheinlicher Fehler	Kreuzungswinkel berechnet	Differenz zwischen Beobachtung und Rechnung
0°	2,15°	0,106°	2,166°	− 0,016
15	1,99	0,064	2,062	− 0,072
30	1,78	0,195	1,781	− 0,001
45	1,51	0,075	1,397	+ 0,113
60	1,15 [1]	0,114	1,013	+ 0,137
75	0,81	0,084	0,732	+ 0,078
90	0,46 [2]	0,062	0,628	− 0,168

$\gamma = 0,628^\circ$ $\qquad 2\delta = 1,5375^\circ$.

Die wahrscheinlichen Fehler des Beobachtungsmittels sind aus den von VOLKMANN für die einzelnen Reihen angegebenen Werten berechnet. Man sieht, daß die Abweichung zwischen Rechnung und Beobachtung im allgemeinen nicht größer ist, als die wahrscheinlichen Fehler, welche bei solchen Beobachtungsreihen vorkommen, und wir dürfen die Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtungen wohl für befriedigend ansehen.

Nachdem wir die Lage der Deckpunkte in den beiden Sehfeldern bestimmt haben, können wir dazu übergehen, die Lage derjenigen Punkte des äußeren Raumes zu bestimmen, welche sich auf korrespondierenden Stellen beider Netzhäute abbilden und deshalb einfach gesehen werden. Man nennt den Inbegriff dieser Punkte den **Horopter**. Derselbe ist im allgemeinen eine Kurve doppelter Krümmung, welche als die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades (Hyperboloide mit einer Mantelfläche, Kegel oder Zylinder) angesehen werden kann. Die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades ist im allgemeinen vom vierten Grade, d. h., kann von einer Ebene in je vier Punkten geschnitten werden. In dem hier vorliegenden Falle haben aber die beiden schneidenden Flächen eine gerade Linie gemein, welche nicht Horopter ist, und der Rest der Schnittlinie ist eine **Kurve dritten Grades**, d. h. eine solche, welche von einer beliebigen Ebene nur in drei Punkten geschnitten werden kann. Diese Kurve hat die bemerkenswerte Eigenschaft, daß wenn man durch irgendeinen festen Punkt derselben einerseits und durch alle anderen Punkte der Kurve andererseits gerade Linien legt, diese Linien einen Kegel zweiten Grades bilden. Wählt man als Spitze des Kegels einen unendlich entfernten Punkt der Kurve (dieselbe läuft nämlich mit mindestens zwei Ästen in das Unendliche hinaus), so wird der Kegel ein Zylinder, dessen Basis eine Kurve zweiten Grades ist. Um eine Anschauung von der Gestalt einer solchen Kurve dritten Grades zu geben, können wir uns dieselbe auf eine Zylinderfläche gezeichnet denken und die Zylinderfläche in die Ebene abgerollt.

Die ausgezogene Kurve *eabcf* der Fig. 60 würde dann die Form der Kurve darstellen. Man denke sich das Papier zu einem Zylinder mit kreisförmiger Basis zusammengerollt, so daß die Linien *gg* und *hh* aufeinanderfallen, so würde die gezeichnete Kurve die Form einer Kurve dritten Grades erhalten. Die punktierte Kurve bezeichnet die Schnittlinie einer Ebene (z. B. der Visier-

[1] Bei VOLKMANN, S. 213, ein Rechnungsfehler.
[2] Mittel aus den beiden Versuchsreihen 106 u. 107.

ebene) mit dem Zylinder. Von dieser Ebene wird die Kurve dritten Grades in drei Punkten *a*, *b*, *c* geschnitten. An zwei Stellen *e* und *f* läuft die Kurve in das Unendliche aus, indem sie sich asymptotisch der geraden Linie *g g* oder der damit identischen *h h* nähert.

Betrachten wir die Kurve dritten Grades als Horopterkurve, so muß dieselbe durch die Mittelpunkte der Visierlinien beider Augen gehen. Es seien *b* und *c* die Orte der beiden Augen, *a* der Fixationspunkt. Dann fällt das Stück der Kurve, welches zwischen ihnen liegt, nämlich *b c* zwischen beide Augen in das Innere des Kopfes und kann nicht als Teil des Horopters (wenigstens nicht nach dem gewöhnlichen Sprachgebrauche, dem die oben gegebene Definition entspricht) angesehen werden, weil Punkte dieses Teiles, wenn sie Strahlen aussenden und diese wirklich in beide Augen fallen könnten, sich auf den beiden äußeren, also nicht korrespondierenden Netzhauthälften abbilden würden; wie denn überhaupt die ganze Bestimmung des Horopters für die den Augen sehr nahe gelegenen Raumpunkte, von denen sie nur breite Zerstreuungsbilder

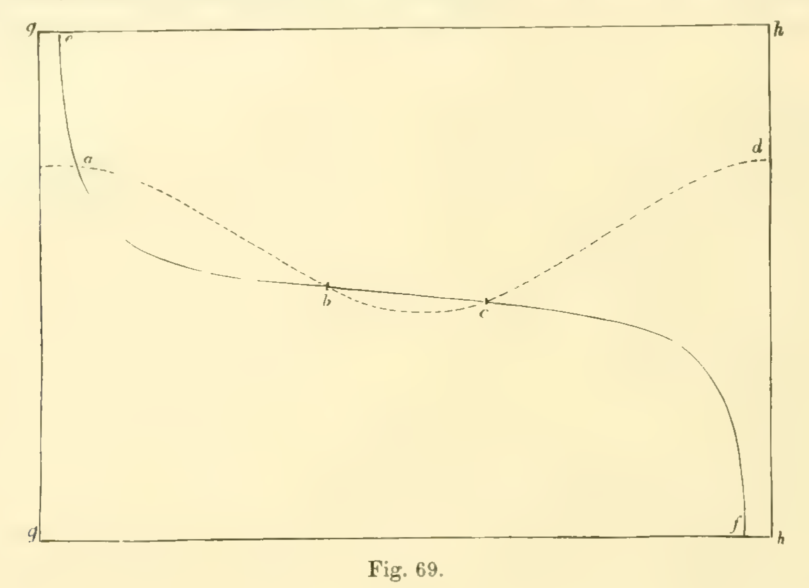


Fig. 69.

bilden können, alle praktische Bedeutung verliert. Der Horopter, als solcher, besteht dann also aus zwei vollkommen getrennten Zweigen, *e b* und *f c*, aus denjenigen beiden Stücken der Kurve dritten Grades, welche zwischen den Augen und Unendlich liegen. Da es für die mathematische Behandlung bequemer ist, die Kurve dritten Grades in ihrem ganzen Zusammenhang zu betrachten, wollen wir sie die Horopterkurve nennen und den Namen des Horopters oder Punkthoropters für diejenigen Stücke derselben bewahren, welche einfach gesehen werden. In der Horopterkurve schneiden sich also korrespondierende Visierlinien, aber bald beide mit ihren vorderen Abschnitten, bald die eine nur mit der hinteren Verlängerung; wo das letztere geschieht, ist sie nicht Horopter.

Unter gewissen Bedingungen kann die Horopterkurve sich übrigens ihrer geraden Asymptotenlinie *g g* und der zu einer ebenen Kurve zweiten Grades zusammengelegten Linie *a a* soweit nähern, daß sie mit ihnen zusammenfällt. Dann besteht die Horopterkurve also aus einer geraden Linie und einer ebenen

Kurve zweiten Grades, die sich in einem Punkte schneiden. Die beiden getrennten Zweige der Horopterkurve sind dann in diesem Schnittpunkte zusammengestoßen. Es geschieht dies, so oft die beiden Netzhauthorizonte gleiche, aber nach entgegengesetzten Seiten gekehrte Winkel mit der Visierebene bilden, während der Fixationspunkt in endlicher Entfernung liegt, und diese Bedingung ist bei Augen, deren Bewegungen dem Listingschen Gesetze folgen, wiederum erfüllt, wenn der Fixationspunkt entweder in der Medianebene des Kopfes, oder in der Primärlage der Visierebene liegt. Im ersten Falle liegt der Fixationspunkt auf der geraden Horopterlinie, im zweiten auf dem Kegelschnitt, der unter dieser Bedingung ein Kreis wird, J. Müllers Horopterkreis. Und endlich wenn der Fixationspunkt sowohl in der Medianebene des Kopfes, als auch in der Primärlage der Visierebene liegt, so schneiden sich in ihm die gerade Horopterlinie und der Kreis. Genauere Konstruktionsmethoden für die Lage der Horopterlinien werden unten mit der mathematischen Theorie des Horopters gegeben werden.

In einem einzigen Falle ist der Horopter eine Fläche, und zwar eine Ebene, wenn nämlich der Fixationspunkt in der Medianebene in unendlicher Entfernung liegt und die Netzhauthorizonte, wie es bei normalsichtigen Augen mindestens sehr angenähert zu sein pflegt, dabei in der Visierebene liegen. Diese Horopterebene ist dann der Visierebene parallel; ihre Entfernung von dieser hängt ab von der Größe der Divergenz der scheinbar vertikalen Meridiane beider Sehfelder; sie geht nämlich durch die Schnittlinie der genannten beiden Meridianebenen und pflegt für normalsichtige Augen, die geradeaus gegen den Horizont gerichtet sind, mit der Fußbodenebene des stehenden Beobachters nahehin zusammenzufallen, während sie bei kurzsichtigen meist in größerer Entfernung liegt.

Die Entfernung der Mittelpunkte meiner Augen voneinander ist 68 mm, ihre Höhe über dem Boden 1660. Legt man durch ihre Mittelpunkte und die Medianlinie des Fußbodens Ebenen, so schneiden sich diese unter einem Winkel von 2° 20′ 48″; der Winkel zwischen meinen scheinbar vertikalen Meridianen beträgt 2° 22′. Bei Herrn Dr. Knapp, welcher normalsichtig ist, beträgt die Augendistanz 62,5, die Höhe der Augen über dem Boden 1627 mm. Dies entspricht einem Winkel von 2° 14′ 20″. Die Beobachtung ergab im Mittel 2° 8′. Bei Herrn Professor Volkmann, der schwach kurzsichtige Augen von derselben Distanz und nahehin derselben Höhe über dem Boden hat, wie ich selbst, ist die Abweichung etwas größer, da der Winkel zwischen den scheinbar vertikalen Meridianen nur 2° 9′ beträgt. Bei Herrn Dr. Dastich ist die Augendistanz 62,8, die Höhe über dem Boden 1640, der entsprechende Winkel würde 2° 11′ sein; der Konvergenzwinkel der vertikalen Meridiane war bei ihm größer, 2° 33′ bis 2° 40′.

Ich halte es für nicht unwahrscheinlich, daß in diesem Verhältnis der Grund für die schiefe Lage der scheinbar vertikalen Meridiane liegen mag. Wir sahen oben, daß das Augenmaß im monokularen Gesichtsfelde keinen sicheren Anhaltspunkt für ihre Feststellung gibt, weil Winkel, deren Schenkel nicht übereinstimmende Richtung haben, nicht durch Deckung mit denselben Netzhautstellen verglichen werden können. Wenn wir nun beide Augen gebrauchen und sie auf weit entfernte Gegenstände richten, welche allein konstante Resultate für die Vergleichung der Ausmessungen beider Sehfelder geben, so haben wir oberhalb des Horizontes meist den Himmel, der bei Tage keine scharfgezeichneten Objekte darbietet, und unterhalb des Horizontes den Fuß-

boden, der nicht nur bestimmte Merkpunkte in Menge darzubieten pflegt, sondern dessen Beachtung im indirekten Sehen wesentlich notwendig ist, wenn wir vorwärts gehen. Daraus kann sich dann bei normalsichtigen Augen die Übung bilden, die Bilder derjenigen Netzhautpunkte gleich zu lokalisieren, auf welchen beim Gehen die gleichen Punkte des Bodens sich abzubilden pflegen. Kurzsichtige Augen, die den Fußboden nicht deutlich sehen, werden diesem Einflusse entzogen sein und ihre Identitätsverhältnisse mehr an nahen Gegenständen ausbilden müssen.

Zu erwähnen ist noch, daß, wenn bei aufrechter Haltung des Körpers und Kopfes ein Punkt der Fußbodenlinie betrachtet wird, der auch in der Medianebene des Kopfes liegt, zwar nicht die ganze Bodenebene Horopter ist, aber doch die gerade Horopterlinie ganz in die Bodenfläche fällt.

Es scheinen übrigens auch Augen vorzukommen, bei denen die scheinbar vertikalen Meridiane nicht ganz gerade sind, sondern in der Gegend des Fixationspunktes eine schwache Knickung haben, so daß ihre oberen Hälften einen kleineren Winkel miteinander machen, als die unteren. Ein in optischen Beobachtungen sehr geübter Studierender beschrieb mir die Erscheinungen in seinen Augen so. Da scheint dann der Einfluß des Fußbodens nur für die unteren Teile der Sehfelder (obere Netzhauthälften) sich geltend gemacht zu haben, während für die anderen Teile nicht das Bedürfnis gerade Linien als gerade zu sehen entscheidend war, sondern Beobachtungen an steiler stehenden Objektflächen ein selbständiges Identitätsverhältnis ausbildeten.

Die bisherigen Angaben bezogen sich auf den Horopter, als Ort von Punkten, welche einfach gesehen werden sollen. Wenn Linien einfach gesehen werden sollen, so ist nur nötig, daß die Linien beider Netzhäute, auf denen sie abgebildet sind, Decklinien seien, ohne daß gerade Punkt für Punkt der Bilder korrespondiert. Wenn ein zweites Bild einer Linie in Richtung der Linie selbst verschoben ist, kann es mit dem ersten doch noch in ganzer Länge sich decken. Dieser Fall wird namentlich an geraden Linien, die sich in sich selbst fortdauernd kongruent verschieben können, vorkommen. Die Fläche, in welcher gerade Linien bestimmter Richtung liegen müssen, um in dieser Weise zwei korrespondierende Bilder zu liefern, heißt ein Linienhoropter. Derselbe heißt Vertikalhoropter für die Linien, die in den beiden Sehfeldern normal zu den Netzhauthorizonten erscheinen, Horizontalhoropter für die, welche den Netzhauthorizonten parallel erscheinen. Ein solcher Linienhoropter für Linien, deren Bilder in den Sehfeldern parallele Richtung haben, ist im allgemeinen ein Hyperboloid mit einer Mantelfläche, was in besonderen Fällen in einen Zylinder oder Kegel übergehen kann. Der Linienhoropter für solche Systeme gerader Linien, die sich in einem Punkte der Horopterkurve schneiden, ist ein Kegel zweiten Grades, welcher den gemeinsamen Schnittpunkt mit den anderen Punkten der Horopterkurve verbindet.

Überhaupt wird jede gerade Linie, welche durch zwei Punkte der Horopterkurve geht, einfach gesehen, und durch jeden binokular gesehenen Punkt des Raumes läßt sich mindestens eine einfach erscheinende gerade Linie legen. Diese letztere läßt sich folgendermaßen finden. Von dem betreffenden Punkte werden die Visierlinien nach beiden Augen gezogen; die eine sei bezeichnet mit a, die andere mit b'. Im ersten Auge gibt es eine Visierlinie b, die mit b' korrespondiert, und im zweiten Auge eine solche a', die mit a korrespondiert. Man lege eine Ebene durch a und b, eine zweite durch a' und b';

die Linie, in der beide Ebenen sich schneiden, ist die gesuchte einfach gesehene Linie.

Ich lasse hier noch die Beschreibung der Konstruktion folgen, mittels deren man in den beiden oben erwähnten einfacheren Fällen die Lage des Vertikal- und Horizontalhoropters und damit auch die Lage der Horopterkurve finden kann, unter der Voraussetzung, daß die Augen des Beobachters dem Bewegungsgesetze von LISTING folgen und in der Primärstellung keine merkliche Abweichung der Netzhauthorizonte von der Visierebene haben.

A. Fixationspunkt in der Meridianebene. Der Vertikalhoropter ist ein Kegel, der Horizontalhoropter besteht aus zwei sich schneidenden Ebenen, die Horopterkurve aus einer geraden Linie und einem ebenen Kegelschnitt.

In Fig. 70 falle die Ebene der Zeichnung zusammen mit der Meridianebene des Kopfes des stehenden Beobachters, und die Haltung des Kopfes so,

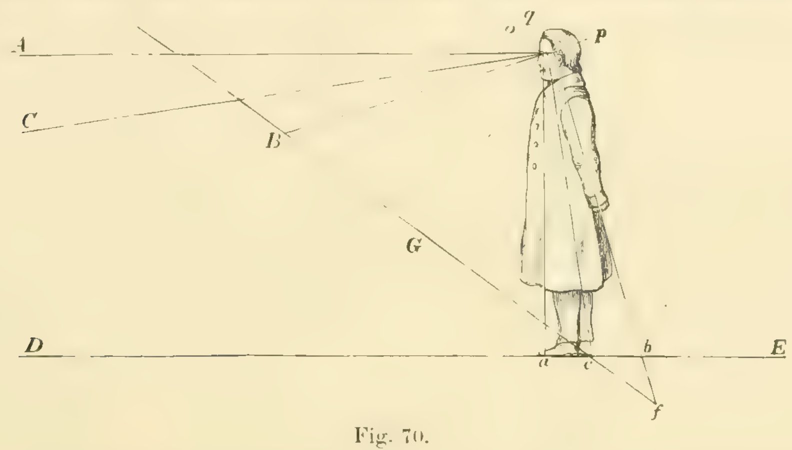


Fig. 70.

daß die Primärlage der Blicklinien horizontal und parallel Ao in die Ferne gerichtet sei. Der Punkt o sei der zwischen den Mittelpunkten der Visierlinie beider Augen mitten inne gelegene Punkt. Man errichte in o das Lot oa auf der Linie oA und mache es so lang, daß sich in seinem tiefsten Punkte a die scheinbar vertikalen Äquatorialachsen der Augen, wie sie in der Primärlage der Blicklinien gestellt sind, schneiden. Eine horizontal durch a gelegte Ebene, die durch DE geht, ist dann der Horopter für die Sehrichtung oA. Diese Ebene fällt, wie bemerkt, bei normalsichtigen Augen nahehin mit der Fußbodenfläche zusammen.

Nun werde B Fixationspunkt, welcher Punkt in der Ebene der Zeichnung, d. h. in der Meridianebene des Kopfes des Beobachters angenommen wird. Bo ist die Schnittlinie der Visierebene mit der Medianebene. In der Visierebene denken wir uns den MÜLLERschen Kreis konstruiert, der durch B und die Zentra der Visierlinien beider Augen geht; sein medianer Durchmesser sei Bp. Man errichte auf Bp das Lot pb, in welchem die Spitze des Vertikalhoropterkegels liegt.

Um den Ort dieser Spitze zu finden, nehmen wir einen dritten Fixationspunkt zu Hilfe C, der so gewählt ist, daß wenn wir unter o' das Zentrum der Visierlinien des einen oder anderen Auges verstehen, welcher Punkt also etwas vor oder hinter der Ebene der Zeichnung in einem in o errichteten Perpendikel liegen müßte, dann die Linie Co' den Winkel $Ao'B$ halbiert.

Die Visierebene für den Fixationspunkt *C* ist dann die eine Ebene des Horizontalhoropters für den Fixationspunkt *B*. Die zweite Ebene des Horizontalhoropters ist die Medianebene. Konstruiert man in der Visierebene für *C* den MÜLLERschen Kreis, d. h. einen Kreis, der durch den Fixationspunkt und die beiden Zentra der Visierlinien geht, und dessen Durchmesser *Cq* sein möge, so werden einfach gesehen 1. alle geraden Linien überhaupt, welche in der Ebene *Coo'* liegen, 2. alle geraden Linien in der Medianebene, welche durch den Punkt *q* gehen. Bei den letzteren aber freilich korrespondiert das Bild ihres entfernteren Endes im einen Auge mit dem Bilde des näheren Endes im anderen.

Man errichte in *q* ein Lot auf *Cq*, welches die Linie *DE* in *c* schneidet, dann ist *Bc* die gerade Horopterlinie und der Punkt *f*, in welchem sich *Bc* und *pb* schneiden, ist die Spitze des Vertikalhoropterkegels, welcher übrigens durch den MÜLLERschen Kreis vom Durchmesser *Bp* in der Visierebene des Beobachters geht, und dadurch gegeben ist.

Während also die eine Linie des Punkthoropters die Gerade *Bf* ist, ist die zweite diejenige Ellipse, in welcher der Kegel die Ebene *Coo'* schneidet.

Der Schnitt *Bp* des Kegels ist kreisförmig und steht rechtwinkelig auf der Kante *pf* des Kegels; ein Schnitt, der auf der diametral gegenüberliegenden Kante *Bf* senkrecht steht und die Medianebene in *Go* schneiden mag, muß ebenfalls kreisförmig sein. Die durch die Mittelpunkte der Augen gelegten Schnitte des Kegels, welche zwischen *Bo* und *Go* hineinfallen, müssen Ellipsen mit längerer Querachse sein. Die außerhalb des Winkels *BoG* fallen, wie *Co* müssen Ellipsen mit längerer medianer Achse sein, beziehlich Parabeln oder Hyperbeln, wenn sie die Linie *Bf* erst jenseits *f* schneiden sollten.

Fig. 71.

B. Der Fixationspunkt in der Primärlage der Blickebene. Der Vertikalhoropter ist in diesem Falle ein Hyperboloid, welches die Visierebene in einem Kreise (MÜLLERschen Horopterkreise) schneidet, der durch den Fixationspunkt und die beiden Zentra der Visierlinien geht. Der Horizontalhoropter besteht aus zwei Ebenen, von denen die eine die Visierebene, die andere normal dazu ist. Die Horopterkurve besteht aus dem MÜLLERschen Kreise und einer geraden Linie.

Es seien in Fig. 71 *a* und *b* die Zentra der Visierlinien für beide Augen, *c* der fixierte Punkt, so ist der durch *abc* gelegte Kreis der MÜLLERsche Horopterkreis und ein Teil der Horopterkurve. Es sei ferner *fg* die Medianlinie der Visierebene, so schneidet die gerade Horopterlinie den Kreis in *f*, also seitlich vom Fixationspunkte. Man ziehe den Durchmesser *cd* und die Linie *fd*. In letzterer errichte man eine Ebene normal zur Ebene des Kreises; diese ist die zweite Ebene des Horizontalhoropters. Alle geraden Linien, die in dieser Ebene liegen und durch den Punkt *d* gehen, werden einfach gesehen; andererseits auch alle geraden Linien, die in der Visierebene liegen.

Um die gerade Horopterlinie vollständig zu konstruieren, schneide man auf fd die Länge $fh = fa$ ab, errichte in h ein Lot auf der Visierebene; dieses schneidet die Fußbodenfläche, d. h. die unendliche Horopterebene für die Primärlagen der Blicklinien, in demselben Punkte wie die gerade Horopterlinie, und dadurch ist letztere zu finden.

Wenn die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane gleich Null ist, wird die gerade Horopterlinie senkrecht zur Ebene des Kreises.

Empirisch kann man die Richtung des Linienhoropters finden, wenn man einen glänzenden geraden Draht oder einen weißen gespannten Faden vor dunklem Grunde so richtet, daß man ihn durch zwei verschiedenfarbige Gläser einfach sieht, oder besser so, daß man bei etwas vermehrter oder verminderter Konvergenz der Augen ihn in parallelen Doppelbildern erblickt. Hält man z. B. einen senkrechten Draht nahe vor die Augen in der Medianebene des Kopfes und fixiert seine Mitte bei horizontaler Blickrichtung, so wird man finden, daß sein oberes Ende im rechten Auge etwas nach links, im linken nach rechts hinüber geneigt erscheint. Fixiert man einen Punkt, der nahe hinter der Mitte des Drahtes liegt, so erscheint dieser in nach oben divergierenden gekreuzten Doppelbildern; fixiert man einen etwas näheren Punkt, so erscheint der Draht in nach unten divergierenden ungekreuzten Doppelbildern. Um den Draht durch zwei farbige Gläser genau einfach, oder um ihn in genau parallelen Doppelbildern zu sehen, muß man sein oberes Ende etwas vom Beobachter entfernen. Es wurde diese Erscheinung zuerst von Baum beobachtet und von Meissner, wie früher erwähnt ist, zur Untersuchung der Raddrehungen der Augen benutzt. Sowie nämlich durch Raddrehung der Winkel zwischen den scheinbar vertikalen Decklinien verändert wird, muß auch die Neigung des Drahtes gegen die Visierebene geändert werden, wenn er einfach erscheinen soll. Je entfernter der Fixationspunkt und je mehr die Blickebene gehoben ist, desto stärker muß der Draht gegen diese Ebene geneigt werden. Bei gesenkter Blickrichtung und nahem Fixationspunkte dagegen kann er senkrecht gegen die Blickebene, oder sogar mit seinem oberen Ende dem Beobachter zugeneigt stehen.

Nachdem wir in solcher Weise bestimmt haben, welche Dimensionen in beiden Sehfeldern als gleich und ungleich erscheinen, haben wir noch die Genauigkeit dieser Vergleichung der Sehfelder zu untersuchen. Diese Genauigkeit ist, wie schon im vorigen Paragraphen erörtert wurde, sehr groß, wenn es sich wie beim gewöhnlichen Gebrauche der Augen darum handelt, Verschiedenheiten der Tiefendimensionen der gesehenen Objekte zu erkennen. Die Vergleichung ist dagegen verhältnismäßig ungenau und mancherlei Täuschungen unterworfen, wenn es sich darum handelt, Doppelbilder zu erkennen, oder die Lage der Bilder in den beiden Sehfeldern zu vergleichen. Obgleich das letztere der einfachere Vorgang zu sein scheinen könnte, während die Beurteilung des stereoskopischen Reliefs mannigfache Erfahrungsmomente zu Hilfe nehmen muß, so ist die letztere doch um so besser eingeübt, weil sie von der hervorragendsten praktischen Wichtigkeit ist, während die Wahrnehmung der Doppelbilder und ihrer Lage gegeneinander nur die Erscheinung der Objekte, nicht diese selbst betrifft. Ebenso vergleichen wir die wirklichen Dimensionen zweier verschieden entfernter Objekte viel sicherer, als die Gesichtswinkel, unter denen sie erscheinen, obgleich die letzteren unmittelbar gleichen oder ungleichen Netzhautstrecken entsprechen, während bei ersterer Vergleichung

eine lange Einübung durch Erfahrung notwendig ist, um den Einfluß der Entfernung auf die Größe der Netzhautbilder desselben Objekts kennen zu lernen.

Was zunächst die Beurteilung der Tiefendimensionen mittels des binokularen Sehens betrifft, so geschieht diese am genauesten bei denjenigen Objekten, welche im Horopter liegen und genau einfach gesehen werden, gewisse oben schon erwähnte Täuschungen ausgenommen, die von mangelhafter Schätzung der Konvergenz der Gesichtslinien herrühren. Weniger genau ist dieselbe für Objektpunkte, die sich zwar vom Horopter entfernen, aber noch nicht so weit, daß die entstehenden Doppelbilder als solche wahrgenommen würden, am geringsten endlich bei Objekten, welche in deutlich getrennten Doppelbildern erscheinen, um so geringer, je weiter diese auseinandertreten.

Ich habe schon früher[1] darauf aufmerksam gemacht, und dasselbe ist durch E. Hering[2] bestätigt worden, daß die Doppelbilder keineswegs, wie es die ältere Annahme war, in der gleichen Entfernung wie das fixierte Objekt erscheinen und etwa auf eine imaginäre Horopterfläche, die durch den Fixationspunkt gehen sollte, projiziert würden. Sondern die Doppelbilder erscheinen nahehin in der richtigen Entfernung, wo sich das entsprechende Objekt befindet. Man kann sich davon durch einfache Versuche leicht überzeugen. Man fixiere ganz fest und ohne die Augen zu verwenden einen Punkt der Wand in der Entfernung von einigen Fuß und halte dabei ein Blatt steifen Papiers so vor den unteren Teil des Gesichtes, daß sein oberer Rand einige Zoll vor den Augen und ungefähr in derselben Höhe liegt. Der Papierschirm verdeckt in dieser Stellung alle Gegenstände, die vor dem Beobachter unterhalb seiner Visierebene liegen. Nun lasse man von einem seitlich stehenden Gehilfen eine Stricknadel von unten her in einer beliebig von ihm gewählten Entfernung so in die Höhe schieben, daß ihr oberes Ende dem Beobachter sichtbar, und zwar, wenn dieser gut und sicher fixiert, von Anfang an nur in Doppelbildern sichtbar wird. Sogleich wird der Beobachter eine Vorstellung von der Entfernung des Drahtes erhalten, auch wenn er nicht ein einziges Mal seinen Fixationspunkt verlassen und die Nadel einfach gesehen hat. Zur Probe versuche er nach dem verdeckten Teile derselben zu greifen, so daß ihm seine Hand auch durchaus verdeckt bleibt. Er wird den Draht gleich beim ersten Versuche treffen, oder wenigstens ganz nahe daran vorbeifahren. Damit der Beobachter hierbei kein Urteil aus der scheinbaren Dicke des Drahtes auf seine Entfernung bilde, was freilich kaum zu fürchten ist, lasse er den Gehilfen aus einem Vorrat verschieden dicker Nadeln eine beliebige wählen.

Auch bei den Versuchen mit beweglichen stereoskopischen Objekten, welche scheinbar ihre Entfernung vom Beobachter ändern, wie bei dem oben, S. 299 Bd. III beschriebenen Instrumente von Halske, kommen oft deutlich getrennte Doppelbilder zum Vorschein, namentlich bei schneller Bewegung, der die Blicklinien nicht schnell genug folgen können, wodurch aber die Täuschung über die scheinbare Tiefenbewegung durchaus nicht gehindert wird.*

Nur bei sehr weit getrennten Doppelbildern, wie sie namentlich von weit entfernten Objekten sich bilden, wenn ein naher Gegenstand fixiert wird, und an denen kaum noch die Zusammengehörigkeit beider Bilder erkannt wird, hört

---

[1] Archiv für Ophthalmologie. X. 1, S. 27.

[2] Beiträge zur Physiologie. Heft 5. S. 335.

* Vgl. über diesen Punkt die Anm. 2 am Schluß des Paragraphen. K.

die binokulare Tiefenwahrnehmung auf und es kann dann wie beim monokularen Sehen die Winkelgröße des entfernten Objekts mit der Winkelgröße des fixierten verglichen werden. Von dem fixierten Objekte kennt man aber die wahre lineare Größe, und diese wird dann unwillkürlich der Maßstab auch für das Bild des entfernteren Objekts. Wendet man sich also zum Beispiel gegen die Häuser jenseits der Straße und fixiert den vorgehaltenen Finger, so werden die in weit getrennten Doppelbildern sichtbaren Häuser scheinbar größer, wenn man den Finger entfernt, kleiner, wenn man ihn nähert. Im ersten Falle nimmt die Winkelgröße des Fingers ab; relativ zu ihm wird die Winkelgröße der Häuser also größer, und wir brauchen den Finger als konstanten Maßstab, da dessen lineare Größe und Entfernung fortdauernd deutlich wahrgenommen wird, die der entfernten Häuser aber nicht.

Wie nun bei solchen weit voneinander getrennten Doppelbildern die zunehmende Unsicherheit der binokularen Tiefenwahrnehmung leicht auffällt, so läßt sich andererseits auch für die ganz und beinahe einfach gesehenen Objekte nachweisen, daß ihr Relief desto genauer erkannt wird, je weniger sie sich vom Horopter entfernen, — abgesehen immer von den oben erwähnten besonderen Täuschungen.

Um dies für die gerade Horopterlinie zu zeigen, nehme man eine dünne gerade Stricknadel und biege sie in der Mitte ganz wenig, so daß ihre beiden Hälften einen Winkel von etwa 175° miteinander machen. Man halte sie dann vor sich, so daß beide Schenkel dieses Winkels in der Medianebene des Kopfes liegen, wobei sie für ein Auge, was sich auf dem Nasenrücken des Beobachters befände, ganz gerade erscheinen würde, und auch für jedes der wirklichen Augen die schwache Biegung, in starker perspektivischer Verkürzung gesehen, ganz unmerklich wird. Doch erkennt man unter diesen Umständen, mit beiden Augen zugleich sehend, die Knickung der Nadel, vorausgesetzt daß diese ungefähr die Richtung der geraden Horopterlinie hat, und also bei Fixation eines entfernteren oder etwas näheren Punktes in merklich parallelen Doppelbildern erscheint. Man erkennt die Knickung der Nadel aber nicht, wenn man derselben eine andere Richtung in der Medianebene gibt, wobei sie einen erheblichen Winkel mit der geraden Horopterlinie macht.

Für den Müllerschen Horopterkreis habe ich den Versuch in folgender Weise eingerichtet: Auf einen Tisch, nahe über dessen Rande sich meine Augen befanden, legte ich nebeneinander zwei Brettchen. In das eine wurden nebeneinander, etwa ein Zentimeter voneinander entfernt, zwei feine lange Stecknadeln festgesteckt, in das zweite Hölzchen eine Nadel derselben Art. Die Hölzchen wurden so nebeneinander gelegt, daß die drei Nadeln sich etwa gleich weit vom Beobachter befanden, die beiden äußeren gleich weit von der mittleren entfernt. Ein passender Schirm bewirkte, daß ich nur die Köpfe und den oberen Teil der drei Nadeln sehen konnte, die etwa 50 cm von meinen Augen entfernt waren. Ich untersuchte nun, wie weit ich die seitliche Nadel nach vorn oder hinten verschieben konnte, ehe ich merkte, daß die drei Nadeln nicht mehr in einer Ebene, sondern in einem Bogen standen. Wenn die Verschiebung auch nur eine halbe Nadeldicke, also etwa ein viertel Millimeter betrug, merkte ich es schon. Der Winkelunterschied in der Stellung der mittleren Nadel im Verhältnis zu den beiden äußeren betrug hierbei nur 21 Sekunden. Um aber eine so große Genauigkeit zu erreichen, mußte die Richtung der Nadelreihe der Richtung entsprechen, die der Horopterkreis an dem

betreffenden Orte hatte. Wenn die Nadeln also gerade vor mir, die mittlere in der Medianebene meines Kopfes und die rechte und linke gleich weit von mir entfernt waren, so urteilte ich mit großer Genauigkeit, ob sie in einer Ebene standen. Befand sich aber die rechte Nadel etwas näher zu mir, die linke ferner, so war ich weit weniger sicher in der Entscheidung, ob sie in einer geraden Linie oder in einem Bogen standen. Befand sich die mittlere Nadel dagegen rechts seitwärts von der Mittelebene meines Kopfes, wo die Richtung des Horopterkreises sich nach rechts hin dem Beobachter nähert, so mußte auch die rechte Nadel mir etwas näher stehen, als die linke, wenn ich die größte Sicherheit in der Beurteilung des Reliefs der Nadelreihen haben sollte. War die Reihe der Nadeln bei dieser Stellung senkrecht gegen die Blickrichtung, so war die Wahrnehmung, ob sie einen Bogen oder eine gerade Linie bildeten, merklich schwieriger. Am günstigsten war es also immer, wenn die Richtung der Nadelreihe der Richtung der Tangente des Horopterkreises entsprach[1].

Es ist bei diesem Versuche zu bemerken, daß man die Nadeln nicht zu weit auseinander rücken darf, weil sonst die erwähnte Täuschung eintritt, vermöge deren wir einen gegen uns konkaven horizontalen Bogen für gerade zu halten geneigt sind. Bei den oben angegebenen Entfernungen der Nadeln würde die Tiefe des Bogens, der als gerade Linie erscheint, für die meisten Augen weniger als 0,1 mm betragen, also viel kleiner sein als die wahrnehmbaren Verrückungen[2]. Und auch bei solchen größeren Entfernungen der Nadeln, wo die Täuschung sichtbar werden sollte, wird man finden, daß der Spielraum zwischen den Verschiebungen, welche einen anscheinend konkaven und konvexen Bogen vortäuschen, sehr viel kleiner ist, wenn die Reihe der Nadeln der Richtung des Horopterkreises sich anschließt, als wenn sie mit ihr einen Winkel bildet.

Wenn wir geradeaus nach einem Punkt des Horizonts blicken, ist der Horopter eine unterhalb der Visierebene liegende horizontale Ebene, welche bei normalsichtigen Augen meist ganz oder nahehin mit der Fußbodenfläche des stehenden Beobachters zusammenzufallen scheint. Wenn wir einen Punkt in der Medianlinie der Fußbodenebene fixieren, so ist zwar nicht die ganze Ebene Horopter, aber die gerade Horopterlinie liegt auch dann doch ganz in der Fußbodenebene. An der Fußbodenebene beobachte ich nun entsprechende Erscheinungen, welche schließen lassen, daß auch in diesem Falle die Beurteilung des Reliefs der Fußbodenebene besonders genau ist, weil sie Horopterfläche ist. Um dies zu prüfen, betrachte man, auf ebenem Felde stehend, zunächst das Relief der Bodenfläche in gewöhnlicher Weise. Man sieht diese Fläche mit ihren kleinen Wölbungen und Senkungen deutlich horizontal bis in ziemlich große Entfernungen. Nun sehe man nach derselben Fläche entweder mit seitwärts geneigtem Kopfe unter dem Arme durch, oder mit abwärts geneigtem Kopfe zwischen den Beinen, wobei man aber auf einen Stein oder Erdhügel steigt, so daß die Höhe des Kopfes über der horizontalen Fläche nicht merklich geändert wird. Man wird nun die ferneren Teile der Bodenfläche nicht mehr

[1] Der Sinn dieses Versuchs ist von Herrn E. Hering in seiner Kritik gänzlich mißverstanden worden.

[2] Daß ich in meiner früheren Arbeit angegeben habe: ein Bogen, dessen Krümmung etwa der des Horopterkreises entspricht, erscheine gerade, beruhte auf Messungen bei zu kleinen Distanzen der Nadeln; der Bogen ist in der Tat beträchtlich flacher, als der des Horopterkreises.

horizontal, sondern wie eine auf die Himmelsfläche gemalte Wand sehen. Ich habe viele solche Beobachtungen auf der von Heidelberg nach Mannheim führenden Straße angestellt. Vor mir lag hinter einer Reihe von Feldern der Neckar, der einen Einschnitt in das ebene Terrain macht, jenseits wieder ebenes Land, welches sich etwa eine Meile weit bis an den Ölberg bei Schriesheim ausdehnt. Bei aufrechter Haltung des Kopfes erkannte ich vollkommen gut die weitgedehnte Ebene jenseits des Flusses; bei schräger oder verkehrter Haltung schien das Terrain vom Flusse aus unmittelbar zu dem Ölberg in die Höhe zu steigen. Eine Hecke, die durch ein Stück Feld von einem dahinter liegenden Hause getrennt war, was ebenfalls bei aufrechtem Kopfe deutlich zu sehen war, schien bei schräger Haltung ganz nahe vor dem Hause zu liegen, und so weiter. Auch die kleinen Unebenheiten der Straße waren mir bei natürlicher Kopfhaltung viel plastischer.

Alle diese Erscheinungen treten ebenso ein, wenn man, statt den Kopf umzudrehen, das Bild umkehrt. Am vorteilhaftesten sind dazu rechtwinkelige Prismen zu verwenden mit horizontal liegender Hypotenusenfläche, durch welche man, wie oben Seite 52 Bd. III erörtert ist, die vorliegenden Gegenstände verkehrt sieht. Ich klebte zwei solche Prismen in der Entfernung meiner beiden Augen voneinander entfernt auf ein ebenes Brettchen und beobachtete durch sie die Landschaft. Das stereoskopische Relief der Bodenfläche schwand hierbei ebenso, wie beim Sehen zwischen den Füßen durch. Andererseits sieht man durch sie zuweilen das Relief niedrig liegender Wolken besser als mit bloßen Augen weil die Wolken, durch die Prismen gesehen, in Richtung des Fußbodens zu liegen kommen.

Wenn man endlich mit verkehrtem Kopfe zwischen den Beinen hindurch und gleichzeitig durch die umkehrenden Prismen die Landschaft betrachtet, so hat man wieder das deutliche Relief der Bodenfläche wie beim natürlichen Sehen. In diesem Falle ist das Spiegelbild der Bodenfläche wieder im Horopter der umgekehrten Augen. Dieser letzte Versuch zeigt, daß nicht die ungewöhnliche Stellung des Kopfes an sich, noch die ungewohnte Richtung des Bildes an der mangelhaften Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung schuld sind, sondern die verkehrte Lage des Bildes gegen die Augen.

Hiermit stimmt es ferner überein, daß Herr E. Hering[1], dessen Augen eine sehr geringe Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane haben, erklärt, daß er die ferneren Teile der Fußbodenfläche mit zwei Augen nicht anders als bei monokularer Betrachtung sehe.

Wie wesentlich die richtige Wahrnehmung des Reliefs der Bodenfläche beim Gehen ist, ist ersichtlich. Meistens gehen wir vorwärts, ohne die Bodenfläche direkt anzusehen, und bleiben doch genügend unterrichtet über die kleinen Unebenheiten ihrer Form. Wie sehr selbst eine ganz kleine scheinbare Verschiebung des Bildes der Bodenfläche stören kann, habe ich neuerdings noch vielfältig erfahren. Wegen eines geringen Grades von Kurzsichtigkeit trug ich bei einer Gebirgsreise eine Konkavbrille (Nasenklemmer) mit ganz schwachen Gläsern (36 Zoll Brennweite), um die Fernsichten besser zu sehen. Die Gläser habe ich so abschleifen lassen, daß ihre optischen Centra gleich weit von-

[1] Beiträge zur Physiologie. Heft 5, S. 355. Daß mir die Fußbodenfläche nicht, wie er aus seiner Theorie schließt, als eine vertikale Ebene erscheint, brauche ich wohl kaum zu versichern.

einander stehen, wie meine Augen, so daß ferne Objekte, durch die Centra der Brille gesehen, keine sichtliche Tiefenverschiebung erleiden, wie dies geschieht, wenn die Centra der Gläser einander zu nahe stehen. Dennoch ist eine kleine Verschiebung der durch die unteren Teile der Gläser gesehenen Objekte da, weil die Achsen der beiden Gläser durch die sie verbindende Feder nicht ganz genau parallel gehalten werden, und wenn ich genau auf den Fußboden achte, so scheint dieser dicht vor meinen Füßen eine kleine ansteigende Wölbung zu haben, die von einer falschen stereoskopischen Wirkung der Gläser herrührt. Obgleich dies so schwach ist, daß es nur bei aufmerksamer Betrachtung bemerkt werden kann, macht mir dieser Umstand es unmöglich, die Brille zu gebrauchen, wenn ich schnell steile steinige Gebirgswege hinabgehen will, wo es nötig ist, den Fuß ganz sicher zu setzen, und die Zeit fehlt, jeden Stein, auf den man treten will, einzeln zu betrachten und seine Entfernung zu schätzen. Trotzdem ich durch die Brille die Steine etwas schärfer sehe, als mit bloßen Augen, gehe ich sicherer ohne die Brille. Es war mir dies ein auffallender Beweis für die Genauigkeit und Schnelligkeit, mit der die eingeübte Assoziation zwischen Sinnesempfindungen und Bewegungen eintritt.

Mit der Veränderung des Reliefs bei veränderter Kopfhaltung scheint mir auch die scheinbare Veränderung der Farben der Landschaft zusammenzuhängen, die dabei eintritt. Solange wir ihre Tiefendimensionen deutlich wahrnehmen, sind die Veränderungen der Farben der Objekte durch die zwischengelagerte Luft die natürlichen und gewohnten Attribute der Ferne, die uns daher nicht als solche auffallen. Sobald wir aber die Wirkung des Reliefs zerstören durch Umkehrung des Kopfes oder Umkehrung des Bildes und die Landschaft als ebenes Bild sehen, so wird unsere Aufmerksamkeit auf die Farben hingelenkt. Auch bei monokularer Betrachtung der Landschaft ist noch ein geringer Unterschied da, wenn man erst aufrecht und dann unter dem Arme durchsieht, der mir davon herzurühren scheint, daß der obere Teil der Netzhaut gegen das Grün des Bodens, der untere gegen das Blau des Himmels ermüdet ist, und deshalb die Farben etwas lebhafter werden, wenn sie auf neue Stellen der Netzhaut fallen. Aber dieses eigentümliche Heraustreten der Lufttöne an den fernen Objekten finde ich nur bei binokularer Betrachtung recht deutlich. Auch hierfür ist es charakteristisch, daß für Herrn Hering seiner Versicherung nach monokulare und binokulare Betrachtung keinen Unterschied macht.

Der Grund dieser besonderen Genauigkeit des Reliefs im Horopter ist, wie auch E. Hering annimmt, in dem psychophysischen Gesetze von Fechner zu suchen. Für Gegenstände im Horopter sind die scheinbaren Entfernungen vom Fixationspunkte gleich; die kleinsten Abweichungen von der Gleichheit dieses Verhältnisses erkennen wir leicht und genau. Einer solchen entspricht eine Abweichung des betreffenden Objektpunkts vom Horopter. Wenn dagegen die Form von Objekten beurteilt werden soll, welche nicht im Horopter liegen, so kommt es auf die Verhältnisse zwischen den Distanzen der Doppelbilder ihrer verschiedenen Punkte an und nicht mehr bloß auf die Existenz eines Unterschiedes zwischen beiden Bildern. Korrespondierende Netzhautpunkte sind nach unserer Ansicht solche, deren gegenseitige Lage in der Erfahrung am häufigsten verglichen worden ist, nach der anatomischen Hypothese solche, welche einen natürlichen Zusammenhang in ihrer Lokalisation haben. Durch beide Voraussetzungen erklärt es sich, daß die Vergleichung korrespondierender oder nahehin korrespondierender Netzhautbilder besser und sicherer geschieht als die von disparaten.

Wir pflegen deshalb auch unwillkürlich Objekte, die wir genau und bequem sehen wollen, möglichst in den Horopter zu bringen. Wenn man bei möglichst bequemer Haltung des Buches, in dem man liest, schwach divergierende Doppelbilder der vertikalen Linien bildet, findet man sie einander parallel, die vertikale Horopterlinie fällt also in die Ebene des Papiers. Für solche Augen, die der Betrachtung ferner Objekte angepaßt sind, stehen dann allerdings die horizontalen Linien des Papiers nicht im Horopter. Es mag das der Grund sein, warum in der Form der europäischen Buchstaben vertikale Linien so auffallend bevorzugt sind gegen die horizontalen.

Die zweite Art der Vergleichung der beiderseitigen Sehfelder ist die, wobei wir die scheinbare Verteilung der Objekte im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beachten und die Doppelbilder wahrzunehmen suchen. Ich habe schon oben angeführt, daß die Erkennung der Doppelbilder im allgemeinen nur in der Mitte der Sehfelder gut geschieht und in deren peripherischen Teilen sehr grobe Ungenauigkeiten zeigt. Der wichtigste Umstand aber, welcher die Wahrnehmungen der verschiedenen Lage zweier Halbbilder eines und desselben Objekts verhindert, ist die Vorstellung von der Einheit dieses ihres Objekts. Wenn, wie wir wahrscheinlich zu machen gesucht haben, die Abmessungen der Sehfelder auf einer eingeübten Schätzung durch das Augenmaß beruhen, so beruht auch die Wahrnehmung der Doppelbilder auf Augenmaß und kann wie alle Schätzungen durch Augenmaß außerordentlich weit irre geführt werden durch allerlei psychische Einflüsse, namentlich durch solche, welche uns die, sei es wahre, sei es falsche Vorstellung aufdrängen, daß die beiden Bilder einem und demselben Objekte angehören. Am schwersten bemerken wir daher die Verschiedenheit der beiden Bilder wirklicher körperlicher Objekte, wenn dieselbe nicht sehr groß und auffallend ist; daher denn auch die meisten Laien das Phänomen der Doppelbilder gar nicht kennen, obgleich sie solche fast fortdauernd in ihrem Gesichtsfelde gehabt haben müssen. Schwer trennen wir auch Doppelbilder von Linien gleicher Färbung und Helligkeit, wenn dieselben so gezogen sind, daß ihre Deutung als Bilder einer und derselben objektiven Linie sehr nahe liegt. Am meisten erschwert aber wird die Wahrnehmung der Doppelbilder durch die Augenbewegungen. Bei der Betrachtung eines Objekts fixieren wir nacheinander verschiedene Punkte seiner Oberfläche, so daß die Netzhautgruben fortdauernd von korrespondierenden Bildern getroffen werden. Diese Teile der Bilder werden zugleich am deutlichsten wahrgenommen und fesseln unsere Aufmerksamkeit am meisten. Sowie unsere Aufmerksamkeit sich einem seitlich gelegenen Punkte des Objekts zuzuwenden beginnt, welcher vielleicht in Doppelbildern erscheint, so gleiten unsere Augen fast unwillkürlich zu seiner Fixation über, was wir nur durch besonders dahin gerichtete Aufmerksamkeit und Willensanstrengung hindern können.*

Will man also Doppelbilder möglichst gut erkennen, so muß man erstens Augenbewegungen vermeiden und einen bestimmten, wohl bezeichneten Fixationspunkt festhalten. Zweitens ist es vorteilhaft, den zu unterscheidenden Bildern verschiedene Farbe oder Helligkeit zu geben, was ihre Deutung als Bilder desselben Objekts erschwert oder unmöglich macht. Drittens kann man oft allerlei andere Ungleichheiten der Bilder durch teilweise Verdeckung, durch

* Über die Methoden, die Doppelbilder sichtbar zu machen, vgl. Anm. 3 am Schluß dieses Paragraphen. K.

Hinzufügung ungleicher Merkzeichen hervorbringen, um die Aufmerksamkeit des Beobachters auf ihre Verschiedenheit hinzulenken, und dadurch die Unterscheidung der Doppelbilder zu einer ziemlich großen Feinheit treiben.

Methoden, mittels deren man den genannten Schwierigkeiten aus dem Wege gehen und möglichst genaue Vergleichungen der scheinbar gleichen Abmessungen in beiden Sehfeldern erhalten kann, sind oben bei der Aufgabe, die Lage der korrespondierenden Punkte und Linien zu suchen, beschrieben worden. Aber auch wenn man die besten Methoden anwendet, ist die Vergleichung korrespondierender Raumgrößen der beiden Gesichtsfelder merklich unvollkommener, als die entsprechender Raumgrößen in demselben Felde.

Um bestimmte Zahlen hierfür zu gewinnen, sind die oben beschriebenen Versuche von Volkmann sehr geeignet. Bei denen, welche nach dem Schema der Fig. 65 angestellt und auf S. 341 Bd. III beschrieben sind, verglich er die vertikalen Abstände zwischen je zwei Paaren von Horizontallinien, von denen das eine Paar im rechten Sehfelde rechts von der Mittellinie, das andere im linken Sehfelde links von der Mittellinie lag. Im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde schienen beide Paare in der Mittellinie zusammenzustoßen. Das eine Paar der Linien hatte einen festen Abstand von 5,5 mm voneinander. Im Mittel von je 30 Beobachtungen solcher Art, wobei Volkmann den Abstand des zweiten beweglichen Paares dem des anderen gleich zu machen versuchte, gewann er zwar sehr gut stimmende Mittelwerte, die nur um 0,01 und 0,03 mm von dem richtigen Werte abwichen. Sieht man aber die einzelnen Beobachtungen an, so findet man, daß er in der ersten Reihe (bewegliche Horizontale rechts) einmal den Abstand 6,0, und dann wieder 5,0 mit 5,5 für identisch hielt, und in der zweiten Reihe kommt wieder 5,0 und 5,85 unter den Einzelbeobachtungen vor. In anderen Reihen, wo die Linien vertikal gezogen waren, kommt 5,55 und 4,75 vor als gleich mit 5,2, und dann wieder 5,55 und 4,85 als gleich mit 5,2.

Es würde nun allerdings ganz unmöglich sein, wenn man die beiden Linienpaare in demselben Sehfelde nebeneinander liegend und aneinander anstoßend erblickte, so große Fehler zu machen. Die Schwierigkeit bei der binokularen Vergleichung scheint mir hauptsächlich ihren Grund darin zu finden, daß die Fixation schwer ganz fest gehalten wird, und die beiden Sehfelder deshalb fortdauernde kleine Schwankungen in bezug auf die Art, wie sie sich decken, zu machen pflegen. Um dies zu prüfen, habe ich auf ein Papierblatt zwei parallele Linien in 5,5 mm Abstand gezeichnet, die bis zum Rande reichen, auf einem zweiten zwei schwach konvergierende, die an einem Ende 4,5, am anderen 6,5 mm voneinander entfernt sind, und nun das erste Blatt auf das zweite gelegt, so daß das konvergierende Linienpaar zum Teil sichtbar bleibt und als Fortsetzung des parallelen Paares erscheint. Während ich nun das obere Blatt fortdauernd ein wenig hin und herbewegte und dadurch die Schwankungen der Sehfelder nachmachte, suchte ich mit einem Auge zu ermitteln, ob die konvergierenden Linien, wo sie am Rande des Papierblattes hervorkommen, gleichweit voneinander abstanden, wie die parallelen. Hierbei wurden also beide Linienpaare in demselben Gesichtsfelde gesehen und durch die Bewegungen des einen Paares das Schwanken der Augenachsen bei der binokularen Betrachtung nachgemacht. Andererseits konnte ich das konvergente Linienpaar mit einem weißen Papierblatt teilweise verdecken und es dann, soweit es sichtbar war, wie bei den Versuchen von Volkmann binokular zur

Berührung mit dem Paar paralleler Linien bringen, so daß im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beide Paare aneinander stießen und das eine als Fortsetzung des anderen erschien. Diese Methode ist noch etwas vorteilhafter, als Volkmanns, bei dem je eine Linie jedes Paares ganz ausgezogen war und sich mit der korrespondierenden deckte, während bei meinen Versuchen, wie bei dem auf S. 346 Bd. III beschriebenen und nach dem Schema der Fig. 67 angestellten Versuche, gar keine Deckung, sondern nur scheinbare Fortsetzung je zweier Linien vorkam. Abweichungen in den Abständen beider Linienpaare von $^1/_2$ mm wurden immer gleich erkannt, solche von $^1/_4$ mm kaum übersehen. Dabei stellte sich heraus, daß ich die binokulare Vergleichung der korrespondierenden Abstände ziemlich ebensogut vollzog, als die monokulare derselben Abstände in dem gleichen Sehfelde, wenn ich im letzteren Falle durch fortdauerndes Hin- und Herbewegen der einen Zeichnung das Schwanken der beiden Sehfelder gegeneinander nachahmte.

Auffallend groß sind auch die einzelnen Fehler in den Versuchen, wo Volkmann die Richtung einer Linie in einem Sehfelde mit der einer anderen im anderen Sehfelde verglich. Es kommen hierbei Abweichungen vom Mittel im Betrage eines halben Grades sehr häufig, solche bis zu einem Grade zuweilen vor. Zwei Linien aber, die im monokularen Sehfelde unter einem Winkel von 179° zusammenstoßen, für eine gerade Linie zu halten, ist ganz unmöglich, und kaum wird man bei solchen, die unter $179^1/_2{}^0$ zusammenstoßen, die Abweichung übersehen. Noch weniger wäre es möglich, im monokularen Felde zwei nahe nebeneinander hinlaufende gerade Linien, die eine Neigung von einem ganzen oder halben Grade gegeneinander haben, für parallel zu halten. Daß nun solche Abweichungen bei Vergleichung beider Sehfelder übersehen werden, scheint mir nur erklärlich zu sein aus den Schwankungen in der Größe der Raddrehungen beider Augen, die man, wie ich oben bemerkt habe, auch mittels der Nachbilder wahrnehmen kann. Daß trotz dieser Schwankungen in den einzelnen Versuchen doch die Mittelzahlen vieler Versuche ein recht genaues Resultat geben können, braucht nicht aufzufallen.

Die sehr viel größere Genauigkeit, welche bei der Beurteilung der Tiefendimensionen wirklicher Objekte erreicht wird, möchte sich demnach wohl größtenteils aus dem Umstande erklären, daß wir außerordentlich viel besser eingeübt sind, an den Konturen eines binokular gesehenen Gegenstandes von bekannter Körperform mit den Blicklinien entlang zu laufen, als eine unveränderliche Fixation bei ungleichen Bildern beider Netzhäute festzuhalten.

Ich muß in dieser Beziehung auf eine Tatsache aufmerksam machen, die ich oft beobachtet habe. Wenn ich eine schwer zu kombinierende stereoskopische Zeichnung vor Augen habe, so gelingt es nur mühsam, zueinander gehörige Linien und Punkte zur Deckung zu bringen, und bei jeder Augenbewegung gleiten sie wieder auseinander. Sowie ich aber ein lebhaftes Anschauungsbild von der dargestellten körperlichen Form gewonnen habe, was oft wie durch einen glücklichen Einfall plötzlich auftritt, so gleite ich mit vollster Sicherheit mit beiden Augen über die Figur hin, ohne daß ihre Bilder sich wieder trennen. Mit dem Anschauungsbilde der Körperform ist auch die Regel für die Art der Bewegung der Blicklinien bei der Betrachtung des Körpers gegeben, ja es kann, wie ich glaube, mit Recht die Frage aufgeworfen werden, ob denn das Gesichtsanschauungsbild einer Körperform überhaupt

einen anderen reellen Inhalt hat, als den, diese Regel für die Bewegungen der Augen zu sein. Wenigstens müssen wir diese Frage verneinen, wenn wir die Ausmessung der Sehfelder aus den bei den Augenbewegungen gemachten Erfahrungen herleiten.

Wir wollen uns jetzt zur Untersuchung derjenigen Umstände wenden, durch welche die Genauigkeit in der Vergleichung beider Sehfelder beschränkt wird, wo also teils Bilder, die auf nicht korrespondierenden Punkten beider Netzhäute abgebildet sind, zusammenzufallen, teils solche, die auf korrespondierenden abgebildet sind, verschiedene Stellung im Gesichtsfelde einzunehmen scheinen.

Der Hauptgrund für die Verschmelzung der Bilder disparater Netzhautpunkte ist die Ähnlichkeit, welche sie mit den beiden perspektivischen Bildern eines und desselben Objekts haben. Je vollkommener eine solche Ähnlichkeit ist, desto schwerer wird es uns, uns loszumachen von der Vorstellung des einen räumlichen Objekts und die Anordnung und gegenseitige Entfernung der einzelnen gesehenen Linien und Punkte im Sehfelde unabhängig von jener Anschauung zu vergleichen.

Betrachten wir z. B. die beiden senkrechten Linienpaare der Fig. *E*, Taf. II, so daß wir die rechte Linie des rechten Paares mit dem rechten, die rechte Linie des linken Paares mit dem linken Auge fixieren, so erscheinen uns in dem Gesamtbilde zwei Linien, von denen die rechte etwas tiefer zurückliegt, als die linke. Die beiden Bilder der linken Linie können dabei nicht auf korrespondierende Netzhautstellen fallen, weil die beiden Linien des rechten Paares 3,5 mm voneinander entfernt sind, die des linken nur 2,7, also 0,8 mm weniger. Dessenungeachtet finde ich es fast unmöglich, zu erkennen, daß die eine oder andere der beiden scheinbar schräg hintereinander stehenden Linien in einem Doppelbilde erscheint. Nur bei sehr anhaltend strenger Fixation der einen Linie sehe ich Andeutungen davon auftauchen. Es wird vielleicht einzelne Beobachter geben, welche auch in diesem Falle die Doppelbilder leicht sehen, andere, denen es gar nicht gelingt; denn es zeigen sich in dieser Beziehung sehr große individuelle Unterschiede.

Bei den beiden Linienpaaren *H* Taf. II ist der Unterschied der Entfernungen größer (3,7 und 7 mm, Unterschied 3,3 mm). Bringe ich sie zur Deckung, so gelingt es mir auch diese als ein weit hintereinander liegendes Linienpaar zu sehen, aber die Doppelbilder der einen oder auch wohl beider Linien verschwinden mir dabei niemals ganz, weil ihr Abstand jetzt verhältnismäßig zu groß ist.

In der Fig. *J* haben die beiden senkrechten Linienpaare ebenfalls ziemlich verschiedene Abstände (6,7 und 9,2 mm, Unterschied 2,5 mm), doch ist der Unterschied ihrer Abstände geringer, als in den Linienpaaren *H*, und durch die oberen und unteren Begrenzungslinien, welche das perspektivische Bild einer rechteckigen Tafel herstellen, ist die Verschmelzung erleichtert. Bei dieser Figur ist für mich der Unterschied gerade hinreichend, daß ich leicht und vollständig die stereoskopische Vereinigung vollziehe, und andererseits doch auch mit geringer Anstrengung der Aufmerksamkeit die vorhandenen Doppelbilder erkennen kann. Fixiere ich im letzteren Falle eine der senkrechten Linien, so erscheint mir die andere im Doppelbilde, und zwar sehe ich die kürzere rechte Linie des Gesamtbildes leichter doppelt als die längere linke. Fixiere ich die rechte Linie des Gesamtbildes und vermehre ganz langsam die Konvergenz der

Augen, indem ich sehr vorsichtig und leise die betreffende Muskelanstrengung, die ich aus langer Übung kenne, eintreten lasse, so kann ich die rechte Linie des Gesamtbildes in Doppelbilder von sehr geringem Abstand etwa 1—1$^1/_2$ mm) auseinander treiben, wobei auch die linke Vertikale in Doppelbildern erscheinen muß, was mir auch für Augenblicke zu erkennen gelingt. Doch ist es sehr schwer, eine solche Augenstellung ohne bestimmtes Fixationsobjekt für einige Zeit festzuhalten, und das fortdauernde Schwanken der Blicklinien verrät sich durch das entsprechende Schwanken des Abstandes der beiden Doppelbilder der rechten Linie. Leichter gelingt es mir, an der Fig. *H* den Blick so festzuhalten, daß das linke Linienpaar ganz innerhalb des rechten erscheint und alle vier Linien einzeln gesehen werden.

Hat der Beobachter also seine Augenbewegungen hinreichend in seiner Gewalt, so kann er die beiden Bilder willkürlich in jeder beliebigen Lage zum Decken bringen und auch im allgemeinen in jeder Lage die Doppelbilder erkennen, vorausgesetzt, daß diese nicht allzu nahe nebeneinander liegen.

Ich bin mir auch wohl bewußt, welche Art von Willensintention ich anwenden muß, um die Doppelbilder entweder zu sehen, oder nicht zu sehen. Will ich sie nicht sehen, so suche ich durch den Blick abzumessen, wieviel die rechte Linie der Fig. *E*, *H* oder *J* mehr von mir entfernt ist, als die linke, ich wende also meine Aufmerksamkeit den Tiefendimensionen zu. Will ich die Doppelbilder sehen, so suche ich zu beurteilen, welche Form das Gesamtbild als gezeichnete Figur in der Ebene des Papiers hat, wie groß etwa der horizontale Abstand der vertikalen Linien nach der Ebene des Papiers gemessen sei, und ähnliches. Es erscheint mir dies durchaus als ein ähnlicher Unterschied, wie er bei der Beurteilung der Form der Flächen eines Cubus z. B. vorkommt, den ich in irgendeiner schrägen Stellung vor mir habe. Ich kann mir den Cubus einmal darauf ansehen, ob seine Flächen wirklich rechtwinkelig seien, und seine Kanten gleich lang, was sich bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit ja auch bei einer schiefen Ansicht desselben erkennen läßt. Oder ich kann den Cubus zeichnen wollen und mir seine Flächen darauf ansehen, wie sie als Parallelogramme im Sehfelde erscheinen. Dann werde ich darauf achten, um wieviel größer die stumpf erscheinenden Winkel aussehen, als die spitz erscheinenden, wieviel größer die eine Diagonale seiner Flächen erscheint als die andere, und so fort. Sind die Flächen perspektivisch sehr verzogen, so werde ich, während ich deutlich wahrnehme, daß die Winkel der Begrenzungsflächen alle gleich und alle Rechte sind, doch nicht ganz übersehen können, daß die drei um eine Ecke herum gelagerten Rechten im Bilde gleich vier Rechten erscheinen, und überhaupt, daß die verschiedenen rechten Winkel verschieden groß erscheinen. Wenn aber die Ansicht nur wenig schief ist, werde ich vielleicht auch bei der größten Aufmerksamkeit und Übung nicht erkennen können, daß die Winkel im Sehfelde verschieden groß erscheinen; so z. B., wenn mein Auge sich in der Verlängerung einer der Kanten befindet, und ich also überhaupt nur eine Fläche des Cubus und diese mit geringer Neigung gegen die Blicklinie vor mir habe. Überhaupt sind wir viel mehr geübt, die wahre körperliche Form, als die Erscheinung im Gesichtsfelde richtig abzuschätzen, worin eine Hauptschwierigkeit des Zeichnens nach Körpern besteht.

Genau so verhält es sich mit den Tiefenanschauungen im Gesichtsfelde und mit den Doppelbildern. Ich wende meine Aufmerksamkeit den Tiefendimensionen zu; dann sind die verschiedenen Entfernungen entsprechender Bildpunkte in

den beiden Netzhautbildern das erfahrungsmäßige sinnliche Zeichen für ein und dieselbe räumliche Dimension des äußeren Objekts, und ihre Verschiedenheit drängt sich der Aufmerksamkeit des Beobachters nur dann auf, wenn sie sehr groß ist; wie die scheinbar rhomboidische Gestalt der Flächen des Würfels nicht ganz vergessen werden kann, trotz der richtigen gleichzeitigen Wahrnehmung ihrer wirklichen quadratischen Gestalt, wenn die perspektivischen Verziehungen sehr groß sind.

Dann aber wieder kann ich meine Aufmerksamkeit der Erscheinung im Gesichtsfelde zuwenden, und werde nun Verschiedenheiten der beiden Bilder bemerken können, die ich vorher übersah; dabei wird sich aber die Wahrnehmung der Tiefendimension ebenso aufdrängen können und mich verleiten, sehr kleine Verschiedenheiten der beiden Ansichten des Körpers zu übersehen, wie die Wahrnehmung der wirklichen Gestalt des Würfels mich vollständig hindern kann sehr kleine perspektivische Verziehungen seiner Fläche zu erkennen. Im einen, wie im anderen Falle handelt es sich darum, die Verschiedenheit gewisser Raumgrößen im Gesichtsfelde zu erkennen, welche wir erfahrungsmäßig als den sinnlichen Ausdruck gleicher Größen im objektiven Raume kennen, nur daß einmal die beiden zu vergleichenden Größen in den beiden verschiedenen Sehfeldern liegen, im anderen Falle beide in demselben Gesichtsfelde.

Wenn ich übrigens in den Fig. *H* und *J* die Tiefendimensionen zur Anschauung zu bringen suche, so gelingt dies am besten, wenn ich den Blick vom einen zum anderen Ende der Tiefendistanz wandern lasse. Aber es gelingt auch, wenngleich weniger lebhaft, bei festgehaltenem Blicke, und zwar finde ich an den von Zeit zu Zeit auftauchenden Doppelbildern, daß ich dann so fixiere, daß die Mitte der linken Figur auf die Mitte der rechten fällt und beide Vertikallinien des Gesamtbildes in Doppelbildern erscheinen. Es ist dies die Stellung, welche die geringsten Distanzen sämtlicher Doppelbilder gibt.

Übrigens wird das Sehen der Doppelbilder erleichtert, wenn man irgendwelche, oft selbst sehr unbedeutende Inkongruenzen in den beiden zu vereinigenden Bildern anbringt, welche der Deutung, als gehörten sie beide ein und demselben räumlichen Objekte an, widersprechen. So braucht man, wie Volkmann gezeigt hat, in der Fig. *E* nur eine Hälfte einer der Linien mit einem weißen Blatte zu verdecken, oder zwei Horizontallinien in verschiedener Höhe in den Zwischenräumen der beiden Paare von Vertikallinien zu ziehen, so daß sich *H* ähnliche Figuren bilden, deren Querstriche aber verschieden hoch liegen. Oder man mache, wie in Fig. *P*, Taf. IV das eine Linienpaar schwarz auf weißem Grunde, das andere weiß auf schwarzem Grunde, wodurch die stereoskopische Vereinigung erschwert, wenn auch nicht unmöglich gemacht wird. In Fig. *G*, Taf. II sind die Linienpaare der Fig. *E* kopiert und nur zwei Punkte hinzugefügt, welche gleiche Entfernung von der links liegenden Linie jedes Paares haben, wobei aber der eine innerhalb, der andere außerhalb der rechten Linie fällt. Vereinigt man die beiden Punkte, indem man sie fixiert, so erscheinen die daneben liegenden beiden Linien sogleich getrennt, denn da die eine rechts, die andere links von dem fixierten Punkte sich befindet, so ist dies ein viel auffallenderer Unterschied, als wenn sie beide an derselben Seite des Fixationspunktes, und nur verschieden weit entfernt lägen. Aber auch, wenn man nicht den Punkt, sondern die linke Linie des Gesamtbildes fixiert, erscheint der Punkt einfach, während die scheinbar hinter ihm

durchgehende rechte Linie jetzt ziemlich leicht als doppelt erkannt wird. Es drängt sich hier die Wahrnehmung auf, daß die rechte Linie der linken einmal näher als der Punkt erscheint, und einmal ferner, und wir erkennen nun, daß der Punkt beide Male gleichweit von der linken Linie entfernt ist, die rechte Linie aber ungleichweit. Dabei tritt durch eine Art Kontrastwirkung der Punkt, der in der Ebene des Papiers erscheinen sollte, vor dieselbe hinaus, als wäre er im rechten Bilde der linken Linie etwas näher, im linken ferner.

Die Verschmelzung kann auch erfolgen zwischen Punkten, die etwas verschiedene Höhe über oder unter dem Netzhauthorizonte haben, z. B. wenn man die beiden Linienpaare der Fig. *F*, Taf. II zum Decken bringt, von denen das linke 3, das rechte 3,7 mm Abstand hat. Bei der Betrachtung reeller Objekte findet dieser Fall seine Analogie, wenn man zwei Horizontallinien, die seitlich von der Medianebene gelegen sind, vor Augen hat. Diese sind dann dem einen Auge näher als dem anderen, und ihr Abstand erscheint ersterem größer als letzterem. Aber die Unterschiede in den vertikalen Abständen, welche bei der Betrachtung reeller Objekte vorkommen, pflegen verhältnismäßig klein zu sein gegen diejenigen, welche zwischen den horizontalen Abständen vorkommen. Damit scheint es zusammenzuhängen, daß nur solche Bilder verschmelzen, deren vertikale Dimensionen sehr geringe Verschiedenheit haben. Auch löst sich die Verschmelzung dieser Linienpaare *F* sowohl, als auch selbst solcher, deren Abstände noch viel weniger verschieden sind, ziemlich bald bei anhaltender fester Fixierung.

Es ist ferner hervorzuheben, daß nicht bloß auf den seitlich von der Netzhautgrube gelegenen Teilen der Netzhäute disparate Bilder verschmelzen können, sondern selbst solche, die dicht bei und auf dem Zentrum der Netzhautgrube liegen. Wenn ich die beiden Kreuze der Fig. *L*, Taf. III zum Decken bringe und den Mittelpunkt des Gesamtbildes fixiere, müssen die beiden nach rechts von den Kreuzen gelegenen Vertikallinien in eine scheinbar kontinuierlich fortlaufende Linie verschmelzen. Das ist auch der Fall, wenn ich sehr sorgfältig und genau die Mitte des Kreuzes fixiere, aber durchaus nicht immer, wenn ich auf das Fixieren nicht besonders achte; sondern bald scheint die obere, bald die untere Vertikallinie weiter vom Kreuze entfernt zu sein, so daß der gegenseitige Abstand der beiden halben Vertikallinien wohl bis zu einem Millimeter oder selbst mehr beträgt, ohne daß dabei erkennbare Doppelbilder der Vertikalen des Kreuzes auftreten. Betrachte ich zuerst das Blatt selbst, also in Konvergenzstellung, und treibe nun die Augen auseinander, bis die Kreuze aufeinander fallen, so bleibt der obere Teil der seitlichen Vertikalen, der dem rechten Bilde angehört, gewöhnlich der entferntere. Es bleibt also etwas zu viel Konvergenz der Augenstellung bestehen. Aber ich kann absichtlich auch die Augen noch etwas weiter auseinander treiben (was für mich immer noch Konvergenzstellung ist, da der Abstand meiner Augen 66 mm und der der Zeichnungen nur 63,5 beträgt); dann tritt die obere Hälfte der Vertikallinie dem Kreuze näher als die untere. In diesem Falle verraten die Schwankungen der leicht vergleichbaren seitlichen Vertikallinien, daß Schwankungen der Augenstellung da sind, die sich nicht durch Doppelbilder der scheinbar fixierten Vertikallinie des Kreuzes verraten. Es ist dies ein Umstand, der bei Versuchen über Doppelbilder wohl zu beachten ist. Man darf nicht glauben, daß bei gewöhnlicher, nicht sehr genauer Fixation eines Punktes dieser immer auf genau korrespondierenden Punkten der Netzhautzentren abgebildet ist. So

finde ich auch, daß ich die Figuren *E* und *F* immer so fixiere, daß das engere Linienpaar ganz innerhalb des weiteren fällt. Um dies zu sehen, brauche ich nur von einem Ende her die Hälfte des einen Linienpaares mit einem weißen Blatte zu verdecken.

Ich hatte eine ähnliche Figur wie *L* erst gebrauchen wollen, um die Größe der korrespondierenden Strecken auf der Horizontallinie zu bestimmen, fand sie aber für mich dazu ganz unbrauchbar, weil die Vertikale des Kreuzes mir auch bei ziemlich großen Verschiebungen der seitlichen Vertikalen immer noch einfach erschien. Dagegen gelang der Versuch viel besser, wenn ich auch von der Vertikale des Kreuzes in der einen Figur die obere, in der anderen die untere Hälfte wegließ.

Es kann auch eine Vertikale des einen Bildes mit zwei ihr nahehin korrespondierenden des andern verschmelzen. In Fig. *T*, Taf. V sind links zwei, rechts drei Linien. Bringt man die rechts liegende Linie beider Gruppen zum genauen Decken, so fällt das Bild der einen linken Linie der linken Gruppe mitten zwischen die beiden linken Linien der rechten Gruppe hinein und verschmilzt mit diesen. Es entsteht dabei der Eindruck eines Gesamtbildes von drei Linien, deren äußerste linke dem Beobachter näher, die dicht daneben liegende zweite dem Beobachter ferner ist, als die rechte Linie. Die drei Linien scheinen ein rechtwinkeliges Prisma zu begrenzen; sie sind auch der richtige optische Ausdruck eines solchen, dessen eine Fläche verlängert durch das linke Auge des Beobachters geht. Um zu erkennen, wo das Bild der einfachen linken Linie liegt, ist deren Mitte mit einem stärkeren Punkte bezeichnet. Fixiere ich die rechte Linie des Gesamtbildes, so fällt dieser Punkt bald auf die eine, bald auf die andere Linie des entsprechenden Linienpaares, bald mitten hinein. Das verrät Schwankungen der Konvergenz.

So kann auch ein Kreis mit einem anderen verschmelzen, der etwas größer oder etwas kleiner ist, wie die Kreise der Fig. *R*, Taf. V. Es entspricht das dem reellen Falle, wo der Beobachter einen seitlich von seiner Medianebene gelegenen Kreis (oder Kugel) betrachtet, der dem einen Auge näher ist als dem anderen. Dabei sind die vertikal verlaufenden Teile beider Kreise leicht und ziemlich dauernd zu verschmelzen, die horizontal verlaufenden Bogenstücke trennen sich dagegen leicht, wenn der Unterschied der Radien beider Kreise nicht relativ sehr klein ist. Der Fixationspunkt ist dabei im Zentrum des Gesamtbildes angenommen. Zu beachten ist bei diesem Versuche, daß ich mich dabei ertappte, wie ich, ohne es zu wissen, den Kopf nach der Seite des größeren Kreises hingewendet hatte, wodurch die scheinbare Größe beider Kreise nahehin gleich wurde. Da gelang natürlich die Verschmelzung sehr viel vollständiger. Wenn man dagegen einen Kreis mit zwei anderen zu verschmelzen sucht, von denen der eine etwas kleiner, der andere etwas größer ist, als jener, wie in Fig. *S*, Taf. V, so findet die Verschmelzung an den nahe senkrecht verlaufenden Teilen der Kreise allerdings statt, und zwar meist so, daß der einfache Kreis an einer Seite mit dem größeren, an der anderen Seite mit dem kleineren zusammenfällt. Oben und unten dagegen trennen sich die Kreise und man sieht Bogen des einfachen Kreises vom großen zum kleinen hinüberlaufen. Man sieht also im Gesamtbilde zwei Kreise, zwischen denen oben und unten allerdings in einer gewissen verwirrten und nicht recht deutlichen Weise noch je ein verbindender Bogen herüberläuft. Der innere Kreis scheint rechts hinter, links vor dem äußeren zu liegen, vermöge einer ähnlichen

stereoskopischen Wirkung wie bei den Vertikalen der Fig. 7, Taf. V. Auch hier tritt die Verschmelzung ein, soweit in den kombinierten Zeichnungen eine Ähnlichkeit mit reellen Objekten gefunden werden kann: wo diese fehlt, trennen sie sich.

Volkmann[1] hat eine Reihe von Messungen angestellt über die Grenzwerte der Differenzen, die beim stereoskopischen Sehen noch verschwinden können. Er blickte mittels eines Stereoskops nach zwei Paaren von je zwei schwarzen Linien auf weißem Grunde, die wir *ab* und *cd* nennen wollen. Eine dieser Linien *d* war ein Menschenhaar, in einem Schieber ausgespannt und mit diesem verschiebbar. Der Schieber wurde anfänglich so gestellt, daß die Linie *a* mit *c* und *b* mit *d* sich stereoskopisch vereinigte, dann wurde die bewegliche Linie *d* ihrer Nachbarin *c* so lange entweder genähert oder von ihr entfernt, bis sie sich von der mit ihr stereoskopisch vereinigten Linie *b* des anderen Paares trennte. Der durch die Linsen des Stereoskops veränderte Gesichtswinkel war so groß, als würden die Linien aus 150 mm Distanz betrachtet.

Wenn auch der Beobachter bei diesen Versuchen die Aufgabe hatte, die eine Linie des Gesamtbildes fest zu fixieren, so glaube ich nach meinen oben beschriebenen Erfahrungen doch annehmen zu dürfen, daß er in Wahrheit die Augen so gestellt hat, daß beide Linien in nahe gleichweit voneinander entfernten Doppelbildern gesehen worden wären, falls er die letzteren hätte unterscheiden können, so daß die wahren Abstände der verschmelzenden Doppelbilder nur etwa halb so groß, oder etwas mehr als halb so groß sein möchten, als die Differenzen der beiden verglichenen Abstände.

Ich lasse hier eine Übersicht von Volkmanns Resultaten folgen, deren jedes einzelne das Mittel aus 15 Beobachtungen ist. Die Werte der Distanz *cd* sind die äußersten, welche mit *ab* zu vereinigen waren, die Längen sind in Millimetern angegeben.

Nr.	Beobachter	*ab*	*cd*	*ab* − *cd*	Bemerkungen
1	Volkmann	5,3	3,46 7,57	+ 1,84 − 2,27	Linien vertikal
2		5,3	4,52 6,62	+ 0,78 − 1,32	ebenso, zwei Monate später
3		1,5	0,91 3,25	+ 0,59 − 1,75	ebenso
4		8,0	5,91 10,99	+ 2,09 − 2,99	ebenso
5		5,3	4,88 6,05	+ 0,42 − 0,75	Linien horizontal
6		1,5	1,15 1,97	+ 0,45 − 0,47	Linien horizontal
7		8,3	7,26 9,01	+ 1,04 − 0,71	ebenso
8	Solger	5,3	2,13 10,00	+ 3,17 − 4,70	Linien vertikal
9		5,3	4,66 5,91	+ 0,64 − 0,61	Linien horizontal
10	Krause	5,3	3,21 8,48	+ 2,09 − 3,18	Linien vertikal
11		5,3	4,92 5,86	+ 0,38 − 0,56	Linien horizontal

[1] Archiv für Ophthalmologie. II, 2, S. 32—59.

Es zeigt sich in diesen Beobachtungen eine beträchtliche individuelle Verschiedenheit für verschiedene Beobachter, und auch bei demselben Beobachter für verschiedene Grade der Übung.

Für Herrn Volkmann selbst wurden nämlich, wie die Zahlen ergeben, die Doppelbilder eher sichtbar, nachdem er zwei Monate lang ähnliche Versuche fortdauernd angestellt hatte. Daß für ihn überhaupt die Doppelbilder bei kleineren Unterschieden der Bilder schon sichtbar wurden, als für die beiden anderen Beobachter, mag sich ebenfalls daraus erklären, daß er von Anfang in physiologisch optischen Beobachtungen viel geübter war; doch ist auch wohl anzunehmen, daß überhaupt die Geschicklichkeit im Augenmaß bei verschiedenen Anwendungen desselben beträchtliche individuelle Verschiedenheiten zeigen wird. Die Zahlen zeigen ferner, daß, wie schon oben erwähnt worden ist, vertikale Abweichungen in den beiden Gesichtsfeldern zwischen horizontalen Linien viel leichter erkannt werden, als horizontale; die letzteren zeigen auch eine geringere Breite individueller Abweichung. Wenn man dabei berücksichtigt, daß wahrscheinlich nur die halbe Breite der angegebenen Differenzen zu nehmen ist, daß davon noch die Breite der Linien selbst mit etwa $^1/_{10}$ mm abgeht, daß endlich der kleinste sichtbare Abstand in 150 mm Entfernung etwa $^1/_{20}$ mm beträgt, so bleibt bei einigen von den Versuchen an den Horizontallinien für die Verschmelzung in der Tat wenig Breite übrig. Andere Versuchsreihen von Volkmann zeigen, daß überhaupt bei wachsendem Winkel zwischen den Linienpaaren und der Vertikallinie die zu verschmelzenden Unterschiede ihrer Abstände kontinuierlich kleiner werden und ihr Minimum bei horizontaler Richtung zeigen.

Weiter suchte Volkmann auch die größten Unterschiede der Richtung je zweier Linien auf, welche die stereoskopische Vereinigung derselben noch zuließen. Beide Linien waren als Durchmesser auf drehbaren Scheiben gezogen, wurden erst miteinander parallel gestellt unter dem in der Tabelle bemerkten Winkel gegen die Vertikale. Dann wurde die rechte Scheibe so weit bald nach rechts, bald nach links gedreht, bis die stereoskopische Vereinigung aufhörte, die Differenz in der Richtung beider Linien ist dann als Winkelabstand angegeben. Die Zahlen sind Mittelwerte aus je 20 (Volkmann) oder 30 (Solger) Beobachtungen; die Länge der Linien ist mit D bezeichnet.

Winkel mit der Vertikale	Winkelabstand Volkmann $D = 60$ mm	Volkmann $D = 20$ mm	Solger $D = 60$ mm
0°	5,5°	7,4°	17,5°
10	5,1	6,9	15,5
20	4,4	6,1	14,0
30	3,8	5,8	11,5
40	3,7	5,3	10,2
50	3,4	4,4	8,9
60	2,7	4,1	6,2
70	2,4	3,3	4,5
80	1,9	2,8	3,9
90	1,5	2,1	2,9

Es geht daraus hervor, wie nahehin vertikale Linien bei viel größeren Unterschieden ihrer Richtung miteinander verschmelzen, als nahehin horizontale und daß auch hier beträchtliche individuelle Unterschiede vorkommen. Kürzere Linien verschmelzen leichter als längere.

WHEATSTONE, der Erfinder des Stereoskops, schloß aus seinen Versuchen, daß ebenso, wie disparate Bilder bei der stereoskopischen Projektion in eines vereinigt werden könnten, so auch korrespondierende Punkte zweier Netzhautbilder an zwei verschiedene Stellen des Raumes verlegt und also doppelt gesehen werden könnten. Diese Folgerung ist vielfach bestritten worden. Wenn man sie aber nur in ihrem richtigen Sinne und ihrer notwendigen Beschränkung auffaßt, wird sie nicht wohl geleugnet werden können. Denn wenn einmal zugegeben wird, daß unter gewissen Umständen und in gewissem Sinne disparate Bilder einfach gesehen werden, so folgt notwendig, daß unter denselben Umständen und in demselben Sinne auch korrespondierende Bilder doppelt gesehen werden müssen. Es seien AC und BD Fig. 72 zwei Flächen, A und B grün, C und D rot. Sie mögen irgendwelchen stereoskopischen Bildern angehören und für den Beschauer sich vereinigen in das einfache Bild einer gegen ihn geneigten Fläche, wobei die Linie ab sich mit der Linie cd vereinigt, obgleich diese Linien in ihrer Richtung nicht genau korrespondieren. Die fixierten Punkte beider Zeichnungen mögen f und g sein und senkrecht über diesen die beiden korrespondierenden Punkte h und i liegen. Die letzteren werden auf verschiedene Seiten von ab und cd liegen können, weil diese Linien der Annahme nach nicht korrespondierende sind. In der Figur sind die Punkte durch Kreuzchen bezeichnet, aber nur um ihre Lage anzudeuten; es wird angenommen, daß sie sich in den stereoskopischen Bildern von dem Grunde, auf dem sie liegen, durch nichts auszeichnen. Dann wird in dem gemeinsamen Bilde der scheinbar wahrgenommenen geneigten Fläche alles Grün links, alles Rot rechts von der binokular gesehenen Grenzlinie beider Flächen gesehen, also auch notwendig der im Grün liegende Punkt h links, der im Rot liegende korrespondierende Punkt i rechts von der Grenzlinie beider Farben. Die Ordnung der Punkte in jedem einzelnen Sehfelde wird offenbar durch den gemeinschaftlichen Sehakt nicht umgeändert werden können. Die beiden Punkte h und i werden dann also auf zwei verschiedenen Punkten der scheinbar vorhandenen geneigten Fläche lokalisiert, nicht aber auf zwei Punkte des Sehfeldes; denn auf dieses wird hierbei überhaupt nicht geachtet. Aber natürlich wird das eben nur so lange geschehen, als unter dem Einfluß des körperlichen Anschauungsbildes eine genaue Vergleichung der relativen Lage von ab und cd zu den Netzhauthorizonten verhindert wird. Sobald wir unsere Aufmerksamkeit von dem scheinbar vorhandenen körperlichen Objekte ab und der Form der Bilder im Sehfelde zulenken, wird es uns bei hinreichender Übung vielleicht gelingen, die Linien ac und cd voneinander getrennt zu sehen, zwischen ihnen einen Streifen, auf dem sowohl Grün wie Rot liegt, und hier das Grün des Punktes h mit dem Rot des Punktes i zusammenfallend.

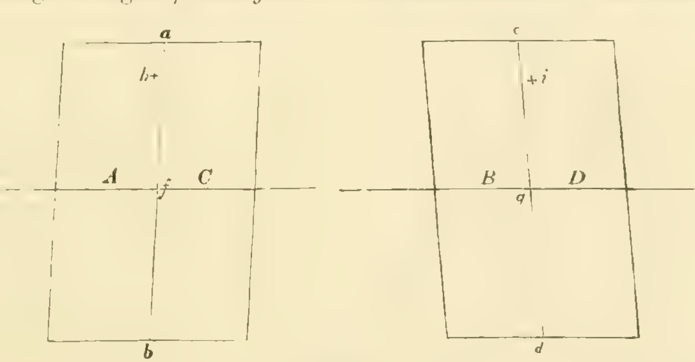


Fig. 72.

Ich bemerke hierbei noch, daß von den Verteidigern der angeborenen Identität der Netzhautstellen angenommen wird, durch den sogenannten Wettstreit der Sehfelder würden in einem solchen Falle die Teile des anderen Bildes, welche den Grenzen der farbigen Flächen entsprächen, ausgelöscht. Unmittelbar neben jeder Kontur würde das Grün und Rot, was ihr anliegt, den korrespondierenden gleichfarbigen roten oder grünen Grund unterdrücken. Aber auch dies zugegeben, so würde doch die Lage der Punkte h und i so gewählt werden können, daß auf ihnen Gleichgewicht des Wettstreits stattfände, und dann würden alle unsere Einwände wieder gelten.

Die Punkte h und i dürfen übrigens nicht gleichartig bezeichnet sein in der Zeichnung, weil sie sonst die Vorstellung eines Objekts, welches hinter der vereinigten Linie ab—cd läge, hervorbringen würden; dann würde also in der Raumanschauung das Nebeneinanderliegen der Punkte und Linien nicht in Betracht kommen.

Will man solche Deckpunkte, deren Bilder getrennt erscheinen sollen, bezeichnen, so muß man sie verschieden bezeichnen. Hierfür hat WHEATSTONE einen viel besprochenen Versuch vorgeschlagen, bei dem in dem einen Sehfelde eine starke schwarze Linie, in dem anderen mit ihr korrespondierend eine ganz feine steht. Diese wird aber unter einem kleinen Winkel von einer anderen starken gekreuzt, und bei stereoskopischen Kombinationen vereinigen sich scheinbar die beiden starken Linien zu einer gegen die Papierfläche geneigten Linie, während die schwache daneben in der Papierfläche erscheint. In WHEATSTONES Figur sind nun allerdings die Neigungsunterschiede der beiden zu vereinigenden Linien so groß, daß die meisten Beobachter sie leicht in Doppelbildern sehen werden, wie dies auch von verschiedenen Seiten hervorgehoben ist. WHEATSTONE selbst gehört offenbar zu denjenigen Beobachtern, die sehr weit getrennte Doppelbilder noch übersehen können, und es muß jeder Beobachter die Neigungsunterschiede der zu vereinigenden Linien seinen Augen anpassen. Ich finde die Wirkung noch sicherer, wenn man jederseits eine starke und eine schwache Linie zieht, die sich unter einem Winkel kreuzen, so daß eine starke der schwachen der anderen Seite korrespondiert, wie dies in *M*, Taf. III, für meine Augen passend geschehen ist. Für Beobachter mit anderer Divergenz der scheinbar vertikalen Meridiane würde freilich eine etwas andere Stellung der Figuren nötig sein. In der genannten Figur hier vereinigt sich mir die starke mit der starken, die schwache mit der schwachen Linie, und es gelingt mir in keiner Weise zu sehen, daß die linke starke sich mit der rechten schwachen deckt. Nur wenn ich durch veränderte Divergenz der Augen die Bilder auseinander schiebe, sehe ich, daß die genannten beiden Linien einander vollkommen parallel erscheinen. Man muß auch nicht glauben, daß eines der Bilder beim Beschauen ganz verschwände und übersehen würde; dann könnte keine stereoskopische Wirkung da sein. Es erscheint aber das gekreuzte Linienpaar deutlich mit dem oberen Ende dem Beschauer genähert, wenn man seine Lage mit den daneben gezogenen dünnen Vertikallinien vergleicht. Eine solche stereoskopische Wirkung würde nicht eintreten können, wenn die rechte dünne Linie gar nicht gesehen würde.

Eine ähnliche Wirkung erhält man von der Fig. *N*, Taf. III, wo die beiden äußeren Grenzlinien der oberen Hälfte des schwarzen Streifens korrespondieren, und ebenso ihre Fortsetzungen, die inneren Grenzlinien, der unteren Hälfte. Im Gesamtbilde sieht man einen schwarzen Streifen, und an diesem

erscheinen die beiden Grenzlinien, die sich korrespondieren, an entgegengesetzten Seiten. Auch in dieser Figur wird die Neigung der schwarzen Dreiecke von solchen Beobachtern, die eine andere Divergenz der vertikalen Meridiane haben, etwas geändert werden müssen.

In den Beispielen *M* und *N* werden es die meisten Beobachter unmöglich finden, zu sehen, daß die sich scheinbar vereinigenden Linien im gemeinsamen Gesichtsfelde sich wirklich nicht decken, und daß im Gegenteil die rechte dünne und linke dicke Linie der Fig. *M*, die entgegengesetzten Ränder der Streifen in *N* aufeinanderfallen. Ich will indessen nicht leugnen, daß bei einem in der Beobachtung von Doppelbildern recht geübten Beschauer die Beobachtung gelingen könnte. Ich selbst bemerke wohl mitunter bei recht scharfer Fixierung der Mittelpunkte, daß ich die betreffenden Linien nicht eigentlich einfach sehe, aber ohne die Doppelbilder bestimmt trennen zu können. Noch leichter trennt man sie, wenn man, wie W. v. Bezold, die Figuren mit Tusche auf einer Glasplatte ausführt, so daß man bei plötzlich geänderter Beleuchtung die eine hell auf dunklem Grunde, die andere dunkel auf hellem Grunde sehen kann. Dann schwindet das Streben zur Verschmelzung, und man erkennt leicht die disparate Lage der Bilder. Ich will hier nur hervorheben und nur das kann ich als den wahren Sinn des Wheatstoneschen Versuches betrachten, daß, solange man in die körperliche Anschauung versenkt bleibt, selbst bei festgehaltenem Fixationspunkte, die Eindrücke korrespondierender Punkte benutzt werden, um differente Teile des körperlichen Gesamtbildes auszufüllen. Wenn man sich unter Umstände versetzt, welche einen Irrtum in der Vergleichung der zwei verschiedenen Bilder beider Sehfelder möglichst begünstigen, werden Bilder disparater Punkte vereinigt und Bilder korrespondierender Punkte getrennt. Das erstere kann, wie gezeigt wurde, sogar nicht ohne das andere vor sich gehen; das zweite ist eine logische Folge des ersten. Daraus folgt aber nicht, wenn man die Art der Beobachtung passend verändert, um die Vergleichung der Bilder beider Sehfelder möglichst ungestört vollziehen zu können, und sich die Bilder disparater Punkte infolgedessen trennen, daß dann die Bilder korrespondierender Punkte sich nicht wieder vereinigen sollten.

Hinzuzufügen ist noch, daß auch bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken die stereoskopische Kombination der letztbeschriebenen Figuren *M* und *N* ganz vollkommen eintritt, und daß man dabei keine Spur von den Doppelbildern sieht, die im gemeinsamen Sehfelde erscheinen sollten, wenn die Bilder korrespondierender Punkte einfach aufeinander gelegt würden. Die Wirkung ist also durchaus nicht von Augenbewegungen abhängig.

Wir haben noch einige andere Umstände zu besprechen, die bei der Verschmelzung von zwei verschiedenen Netzhautbildern zu berücksichtigen sind.

Erstens ist zu bemerken, daß, solange stereoskopische Tiefenwahrnehmung da ist, nicht, wie einige Anhänger der angeblichen Identität der Netzhäute angenommen haben, das eine der beiden Doppelbilder etwa deshalb verschwindet, weil es vollständig übersehen wird und gar nicht zur Empfindung kommt. Wenn letzteres der Fall wäre, würde keine binokulare Tiefenwahrnehmung stattfinden können, die eben nur auf der Verschiedenheit der Bilder und auf der Perzeption dieser Verschiedenheit beruht. Ja, die sehr große Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung zeigt sogar, daß die Verschiedenheit der Bilder auch mit großer Genauigkeit wahrgenommen wird, freilich nicht als eine Verschiedenheit in der Ausfüllung der Sehfelder, sondern nur als sinnlicher Ausdruck der verschiedenen Entfernung

der Objektpunkte. Wo keine Tiefenwahrnehmung zustande kommt, da kommt es allerdings vor, daß einzelne Teile der Bilder zeitweise oder ganz verlöschen; wir werden diese Fälle im nächsten Paragraphen genauer zu besprechen haben.

Zweitens ist noch der Einfluß der Augenbewegungen auf die Verschmelzung der Doppelbilder zu besprechen. In dieser Beziehung hat E. Bruecke die Meinung aufgestellt, daß wir eine Wahrnehmung der Tiefendimensionen des Objekts nur dadurch bekommen, daß wir fortdauernd mit den Blicklinien an den verschiedenen Konturen des gesehenen Objekts entlang laufen und hierbei nacheinander alle einzelnen Punkte dieser Konturen auf den identischen Zentren der Netzhautgrube abgebildet erhalten. Da nun unsere Aufmerksamkeit der Regel nach auf die Bilder der am genauesten sehenden Stelle der Netzhaut konzentriert ist, so konnte mit Grund die Frage aufgeworfen werden, ob nicht deshalb die Doppelbilder der übrigen Teile des Objekts übersehen werden, weil für gewöhnlich die am genauesten gesehenen und unsere Aufmerksamkeit am meisten fesselnden Teile der Bilder korrespondierende sind. Es ist dieser Ansicht von Bruecke gegenüber zuzugeben, daß in der Tat die darin betonten Momente von großem Gewicht für die Gewinnung vollständiger Tiefenanschauungen sind, und daß die von ihm gegebene Beschreibung der Art, wie sie entstehen, den Verhältnissen des gewöhnlichen unbefangenen Sehens vollkommen entspricht. Eine Vereinigung von sehr differenten Bildern gelingt in der Tat nur mittels der Augenbewegungen, indem man nacheinander die einzelnen Teile der Bilder einfach sieht und die Aufmerksamkeit ihren natürlichen Gang gehen läßt, wobei sie immer auf diejenigen Teile vorzugsweise gerichtet ist, welche fixiert werden. Auch wird durch dieses Herumführen des Blickes die Tiefenanschauung entschieden genauer und lebendiger, als bei Fixation eines Punktes, was ich daraus erklären möchte, daß nur die Tiefenunterschiede derjenigen Bildpunkte genau erkannt werden, die dem jedesmaligen Horopter sehr nahe liegen. Dadurch also, daß man die Konvergenz wechseln läßt und nacheinander alle Punkte des wirklichen oder scheinbaren Objekts in den Horopter oder ihm mindestens sehr nahe bringt, erhält man nacheinander eine genaue Anschauung aller Tiefenunterschiede. Fixiert man den Blick längere Zeit auf einen Punkt, so treten im Gegenteil die Doppelbilder leichter hervor und die Tiefenunterschiede namentlich derjenigen Punkte, welche in sehr disparaten Doppelbildern erscheinen, werden undeutlich. Ja, die Doppelbilder, welche man durch sehr anhaltende strenge Fixation eines Punktes nicht voneinander lösen kann, liegen so nahe an der Grenze der Unterscheidungsfähigkeit der Augen, daß ich glaube annehmen zu dürfen, daß sie nur wegen der unvermeidbaren kleinen Augenbewegungen nicht auch aufgelöst werden. Indessen war die von Bruecke aufgestellte Theorie etwas zu ausschließlich, wenn er meinte, daß alle Tiefenwahrnehmungen nur durch Augenbewegungen gewonnen und alle Doppelbilder nur durch successives Einfachsehen der einzelnen Punkte beseitigt werden könnten. Es wurde nämlich von Dove gezeigt, daß auch bei instantaner Beleuchtung durch einen elektrischen Funken stereoskopische Effekte erhalten und Doppelbilder verschmolzen werden können. Es kann dazu der auf S. 164 beschriebene Apparat gebraucht werden. Nur muß man dafür sorgen, daß im Momente der elektrischen Beleuchtung die beiden Blicklinien auf korrespondierende Teile des Bildes gerichtet seien. Zu dem Ende pflege ich zwei feine Nadelstiche durch korrespondierende Punkte der zu vereinigenden Zeichnungen zu machen. Die Wand des dunkeln Kastens, in welchem das Bild angeheftet

wird, ist hinter diesen Nadelstichen selbst durchbohrt und das Zimmer nicht ganz verdunkelt, so daß der Beobachter die beiden Nadelstiche mittels des schwachen hindurchfallenden Lichts sehen kann. Er richtet auf sie die Blicklinien, so daß ihre Bilder im gemeinschaftlichen Sehfelde sich decken, und dann läßt er den Funken überschlagen. Dabei geben stereoskopische Zeichnungen von nicht zu großen Differenzen, wie *E*, *M* und *N*, Taf. II und III, ganz deutliche und lebendige Tiefenanschauung ohne wahrnehmbare Doppelbilder; solche von größeren Differenzen, wie *H*, zerfallen aber in einzelne Linien und geben keine Tiefenanschauung. Auch alle übereinander stehenden Horizontallinien, wie in *F*, trennen sich auffallend leicht. Hat man dabei einfache Zeichnungen von wenigen Linien vor sich, so übersieht man bei der instantanen Beleuchtung das Ganze auf einmal. Hat man dagegen komplizierte stereoskopische Photographien vor sich mit vielen Einzelheiten, so gewinnt man nur von einem gewissen Teile des Ganzen einen deutlichen Eindruck und braucht mehrere Funken, um nacheinander das Ganze zu übersehen. Dabei ist es sonderbar, daß während man die beiden Nadelstiche fest fixiert und in Deckung erhält, man willkürlich vor dem Funken die Aufmerksamkeit auf eine beliebige Stelle des dunklen Gesichtsfeldes richten kann, und dann während des Funkens einen Eindruck nur von den Objekten erhält, die in dieser Gegend des Sehfeldes erscheinen. Es ist in dieser Beziehung die Aufmerksamkeit ganz unabhängig von der Stellung und Akkommodation des Auges, überhaupt von irgendeiner der bekannten Veränderungen in und an diesem Organe, und demgemäß kann sie mit einer selbstbewußten und willkürlichen Anstrengung auf eine bestimmte Stelle in dem absolut dunklen und unterschiedslosen Gesichtsfelde hingerichtet werden. Es ist dies einer der auffallendsten Versuche für eine künftige Theorie der Aufmerksamkeit.

Die Versuche mit momentaner Beleuchtung sind auch noch insofern für die Rolle, welche die Aufmerksamkeit bei den Doppelbildern spielt, interessant, als es bei solchen Bildern, die wie *J* ohne große Anstrengung sowohl stereoskopisch einfach, als auch mit geringer Mühe als Doppelbilder gesehen werden können, leicht gelingt, beides auch beim Lichte des elektrischen Funkens zu sehen. Der erste Eindruck ist gewöhnlich der stereoskopisch einfache; wenn man aber in Pausen von etwa 10 Sekunden, in denen die Nachbilder vollständig erlöschen können, die Beobachtung wiederholt, so fängt man an die Doppelbilder zu sehen, trotzdem man immer denselben Punkt fixiert und jede nachfolgende Lichteinwirkung der ersten absolut gleich ist. Ja, selbst bei solchen Figuren, wie *M*, wo es mir relativ schwer wird die Doppelbilder zu sehen, kann ich sie auch bei instantaner elektrischer Beleuchtung endlich sehen, wenn ich mir vorher lebhaft vorzustellen suche, wie sie aussehen müssen. Der Einfluß der Aufmerksamkeit ist hier reiner zu beobachten, weil jede Einwirkung der Augenbewegungen ausgeschlossen ist. Die gleichen Versuche können auch mit VOLKMANNS schon oben beschriebenem Tachistoskop ausgeführt werden.

Ferner ist zu bemerken, daß es verschiedenen zuverlässigen Beobachtern, wie WHEATSTONE[1], ROGERS[2] und WUNDT[3], gelungen ist, auch Nachbilder, welche nicht ganz genau korrespondierende Lage hatten, zu einer stereoskopischen Tiefenwahrnehmung zu verschmelzen. ROGERS hat es sogar möglich gefunden,

[1] *Phil. Transact.* 1838. T. II, p. 392—393.
[2] SILLIMANS *Journal* (2) XXX, November 1860.
[3] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. S. 286—287.

erst das Nachbild in dem einen, dann im anderen Auge zu entwickeln und schließlich beide Nachbilder stereoskopisch zu kombinieren. Dadurch ist der Einfluß, den die vorausgängige Anschauung der wirklichen Bilder auf die Deutung der Nachbilder allenfalls haben könnte, vermieden. An positiven Nachbildern, die ich selbst durch momentanes Anschauen hell beleuchteter Gegenstände entwickelt hatte, habe ich übrigens auch deutliche Tiefenanschauung gehabt.

Auch diese Versuche zeigen, wie die mit dem elektrischen Funken, daß keine Bewegung der Augen nötig ist, um Tiefenwahrnehmung zu vermitteln, denn bei jeder Bewegung verschieben sich die Nachbilder mit dem Auge und durch keine Augenbewegung können disparate Bilder zu korrespondierenden gemacht werden. Übrigens gelingen die Versuche mit den Nachbildern schwer; diese müssen sehr scharf entwickelt sein, und selbst wenn sie es sind, besteht immer eine Neigung, sie auf die Fläche des reellen Hintergrundes, den man anschaut, zu projizieren und als bloße Flecke auf dessen Oberfläche anzusehen.

Panum hat die Regel für das Verschmelzen der Doppelbilder in der Weise ausgesprochen, daß einander ähnliche Konturen, welche auf nahehin korrespondenten Netzhautpunkten sich abbilden, miteinander verschmelzen sollen. Er bezeichnet dabei den Umfang derjenigen Punkte der anderen Netzhaut, welche mit ein und demselben Punkte der ersten Netzhaut verschmelzen können, als den korrespondierenden Empfindungskreis jenes Punktes. Diesen Empfindungskreisen schreibt er nach Maßgabe der oben erörterten Tatsachen einen größeren horizontalen Durchmesser, einen kleineren vertikalen zu. Ich habe dagegen in der hier gegebenen Darstellung das Verschmelzen der Doppelbilder davon abhängig gemacht, daß die Sicherheit und Genauigkeit der Abmessungen des Augenmaßes für die entsprechenden Dimensionen beider Bilder nicht groß genug sei, um nicht Irrtümer zu erlauben, und daß ein solcher Irrtum begünstigt werde durch die Anschauung des einen körperlich ausgedehnten Objekts, welches man vor sich hat oder vor sich zu haben glaubt. Es hat schon Volkmann gegen Panums Fassung des Gesetzes solche Fälle, wie *G*, Taf. II, geltend gemacht, wo durch Zusetzung eines Punktes oder anderer kleiner Inkongruenzen beider Bilder die Verschmelzung gestört wird. Panum hat dawider entgegnet, daß in diesen Fällen immer eine Unähnlichkeit der Konturen auftrete, welche auch nach seiner Fassung des Gesetzes die Verschmelzung hindern müßte. Gegen andere Versuche von Volkmann, aus denen hervorgeht, daß Linienpaare von kleinem Abstande bei gleicher Differenz des Abstandes nicht so leicht verschmelzen, als solche von größeren Abständen, hat er die Antwort gegeben, daß eng aneinanderstehende Linien sich bei der Fixation ganz nahe am Zentrum der Netzhaut abbilden, und daß dort die korrespondierenden Empfindungskreise kleiner seien und deshalb die Doppelbilder nicht verschmelzen könnten. Volkmanns letzterwähnte Beobachtung können wir aber in folgender Weise wiederholen. In Fig. *U*, Taf. V, sind jederseits 5 Linien gezeichnet; die Paare 1 und 3, sowie 4 und 5 haben in der linken Gruppe den Abstand von 4 mm, in der rechten 5 mm. In das Innere des Paares 1—3 ist jederseits noch die Linie 2 hineingesetzt worden, welche beiderseits von 1 den gleichen Abstand von 3 mm hat und daher von der Linie 3 links nur 1, rechts aber 2 mm absteht. Fixiert man nun die Linie 4 des Gesamtbildes, so erscheint 5 einfach und etwas nach hinten liegend. Fixiert man dagegen fest und sicher 1, so erscheinen die beiden Linien 3 voneinander

getrennt, die Linie 2 dagegen natürlich einfach und mit 1 in gleichem Tiefenabstande. Nur bei Bewegungen des Blickes kann man auch 3 einfach sehen, wobei dann die ganze Gruppe als ein vierkantiges senkrechtes Prisma erscheint, auf dessen vorderer Fläche noch eine Linie, nämlich 2, parallel mit den Kanten gezogen ist. Nun liegen aber bei der Fixation der Linie 1 des Gesamtbildes die beiden Linien 3 gerade so auf den Netzhäuten, wie bei Fixation von 4 die beiden Linien 5 liegen. Das Hindernis der Vereinigung besteht offenbar in der Linie 2, die aber nicht zwischen beiden, sondern links von beiden liegt, und nach PANUMS Fassung des Gesetzes die Vereinigung nicht hindern sollte. Faßt man aber die Vereinigung der Doppelbilder als eine Täuschung des Augenmaßes, so ist aus dem FECHNERschen Gesetze klar, daß die Unterscheidung zwischen 1 und 2 mm des Abstandes, wie ihn die Linien 2 und 3 haben, sicherer sein muß, als zwischen 4 und 5 mm bei den Linien 4 und 5.

Auch bei den Versuchen mit Kreisen kommt Ähnliches vor. Wenn man zwei etwas ungleiche Kreise gezeichnet hat, die sich binokular verschmelzen lassen, und man umgibt beide konzentrisch mit einem anderen Kreise, der auf beiden Seiten gleichen Radius hat, einen Radius wenig größer als der des größeren der beiden ersten Kreise, so trennen sich jetzt die Bilder der beiden inneren Kreise verhältnismäßig leicht.

Eine Frage endlich, die sich hier anschließt und die ebenfalls in theoretischer Beziehung Wichtigkeit hat, ist die, ob wir die Eindrücke des einen Auges von denen des anderen unterscheiden. In dieser Beziehung ist zu bemerken, daß wir auch bei instantaner elektrischer Beleuchtung die Tiefenunterschiede stereoskopisch gesehener Liniengruppen immer richtig sehen, niemals verkehrt, und daß selbst, wenn ich mir möglichst deutlich das umgekehrte Relief der Figur vorzustellen suchte, um mit Absicht eine Täuschung herbeizuführen, was mir bei der Umkehrung des Reliefs von Medaillen bei monokularer Betrachtung meist schnell gelingt, ich es unmöglich fand, das stereoskopische Relief zu ändern.[1] Eine solche Verkehrung des Reliefs würde aber notwendig eintreten müssen, wenn man den Eindruck der beiden Netzhautbilder verwechseln könnte mit demjenigen Eindrucke, welcher bei Vertauschung der beiden Netzhautbilder untereinander eintreten würde. Daraus folgt also zunächst, daß der momentane Eindruck, den zwei Netzhautbilder machen, deutlich und bestimmt verschieden sein muß von demjenigen, welchen dieselben Netzhautbilder machen würden, wenn jedes auf die korrespondierenden Punkte des anderen Auges übertragen würde.

Etwas anderes ist es, daß wir für gewöhnlich kein bestimmtes Bewußtsein davon haben, mit welchem Auge wir das eine oder andere Bild sehen. Das wissen wir nicht oder nur unvollkommen und nur durch nebensächliche Umstände zu beurteilen, wie wir denn aus unseren Sinnesempfindungen nichts herauszulesen wissen, was wir nicht durch oft wiederholte Beobachtungen als ihre Bedeutung kennen gelernt haben. Daß also zwei nahe aneinanderstehende Doppelbilder gewisser Art mit gewissen Lokalzeichen ein Objekt, welches ferner von uns ist als der Fixationspunkt, und nicht ein näheres bedeuten, können wir vollkommen gelernt haben, ohne doch genügende Übung zu haben, um aus den Lokalzeichen der Bilder herauszulesen, welches von den beiden Halbbildern

[1] Dieselben Beobachtungen von AUBERT und MARBACH in AUBERT, Physiologie der Netzhaut. S. 315. Breslau 1865, mit vielfach abgeänderten Figuren. Neuerdings hat auch DONDERS im wesentlichen dieselben Resultate erhalten.

dem rechten oder linken Auge angehöre. Um letzteres zu ermitteln, müssen wir erst das eine Auge schließen oder verdecken, was wir beim gewöhnlichen Sehen nicht tun, wobei wir, wie oben erwähnt, auf die Doppelbilder ja auch gar nicht zu achten pflegen. Wir wissen deshalb in der Regel auch ohne einen besonders darauf zielenden Versuch nicht anzugeben, welchem Auge das eine, welchem das andere Doppelbild angehört. Auch die Augenbewegungen helfen dabei nicht viel, weil wir bei Konvergenzbewegungen — und auf solche käme es hier an — keine deutliche Vorstellung davon haben, nach welcher Richtung sich jedes einzelne Auge verschiebt.

Dagegen sehen wir fortdauernd die am weitesten rechts gelegenen Teile des gemeinsamen Gesichtsfeldes nur mit dem rechten Auge; dem linken werden sie durch die Nase verdeckt; und ebenso sehen wir die ganz links gelegenen Objekte nur mit dem linken Auge, und dementsprechend urteilen wir denn leicht, daß, wenn jene Gegend des Gesichtsfeldes einem Auge ganz verdunkelt ist, wir die gesehenen Objekte mit dem anderen Auge sehen. Rogers hat einen Versuch mit auffallendem Erfolge angegeben, der hierher gehört. Man mache aus schwarzem Papier eine Röhre von etwa 2 Zoll Durchmesser, halte sie vor das rechte Auge und sehe damit nach dem Hintergrunde des Zimmers, am besten nach links hinüber, während man gleichzeitig einige Zoll vor dem linken Auge ein Quartblatt schwarzen Papiers hält, welches diesem den gesehenen Teil des Zimmerhintergrundes verdeckt. Dann tritt sehr energisch die Täuschung ein, als sähe man mit dem linken Auge durch eine Öffnung des Papiers nach dem Hintergrunde des Zimmers, während doch das Papier keine Öffnung hat, und nicht das linke, sondern das rechte Auge durch die Öffnung der Röhre blickt.

Übrigens muß ich doch wiederum bemerken, daß, wenn ich zwei stereoskopische Photographien vor mir habe, von denen eine einen dunklen oder verwaschenen Fleck hat, ich gewöhnlich den Eindruck habe, als wäre das Auge, womit ich den Fleck sehe, getrübt, und daß ich unwillkürlich versuche, mit den Lidern dieses Auges die Trübung wegzuwischen, was doch ein Zeichen ist, daß ich in einem solchen Falle empfinde, in welchem Auge die undeutliche Stelle abgebildet ist.*

Was die Richtung betrifft, in der wir die Doppelbilder sehen, so ergibt sich diese aus dem, was über die Richtung der monokular gesehenen Bilder oben schon gesagt worden ist. Wir sehen das Bild jedes Auges so, als hätte das von E. Hering angenommene imaginäre zyklopische Auge das entsprechende Netzhautbild erhalten, während es nach dem Fixationspunkte hingerichtet ist. Wird also binokular gesehen, so kann man sich beide Netzhautbilder in das imaginäre zyklopische Auge sich gegenseitig deckend eingetragen denken, und dann entsprechend in den Raum projiziert. Ihre Entfernung vom Beobachter wird so weit richtig beurteilt, als die bei Doppelbildern unvollkommene stereoskopische Tiefenwahrnehmung und die Hilfsmittel der monokularen Beurteilung der Entfernung dies möglich machen. Aus der angegebenen von E. Hering und J. Towne[1] gemachten Beobachtung erklärt sich nun auch, warum die

[1] Herr J. Towne hat die wichtigen Beobachtungen über die scheinbaren Sehrichtungen unabhängig von Herrn E. Hering gemacht. Er berichtet mir brieflich, daß er die Versuche schon im Jahre 1859 gezeigt habe. Seine Publikationen, soweit sie mir bekannt geworden sind, datieren aber erst von 1862 ab.

* Über die Unterscheidung rechts- und linksäugiger Eindrücke s. Anm. 4 am Schluß des Paragraphen.

Doppelbilder immer getrennt in den Raum projiziert werden. Würden sie in der richtigen Richtung ihrer Visierlinien projiziert, so würden sie an denjenigen Ort verlegt werden können, wo die betreffenden Visierlinien sich schneiden, und dann einfach erscheinen. In Wahrheit wird aber durch die irrtümliche Beziehung der Sehrichtungen auf ein Zentrum in der Mittelebene des Gesichts bewirkt, daß zwei verschiedene Sehrichtungen vor dem Beobachter im Raume sich nie wieder schneiden können und die in ihrer Richtung projizierten Bildpunkte notwendig immer getrennt bleiben müssen. Über den vermutlichen Grund dieses Irrtums ist schon oben gesprochen worden.

Gesetze der korrespondierenden Punkte und Linien. Man denke sich zwei Ebenen normal zu den beiden Blicklinien in gleicher Entfernung von deren Kreuzungspunkte. In der einen seien die Koordinaten x und y, in der andern ein beliebig gelegtes anderes System ξ und v. Für die Schnittpunkte der beiden Blicklinien mit den Ebenen sei $x = y = 0$ und $\xi = v = 0$. Die Ebenen der Netzhauthorizonte mögen die beiden Ebenen in den Linien

$$ax + by = 0 \quad \text{und} \quad \alpha\xi + \beta v = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

schneiden; die scheinbar vertikalen Meridianebenen in den Linien

$$cx + dy = 0 \quad \text{und} \quad \gamma\xi + \delta v = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{a}.$$

Wenn nun die Koeffizienten so gewählt sind, daß

$$\left. \begin{array}{l} a^2 + b^2 = \alpha^2 + \beta^2 = 1 \\ c^2 + d^2 = \gamma^2 + \delta^2 = 1 \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{b},$$

welchen Bedingungen man immer dadurch Genüge leisten kann, daß man beide Koeffizienten je einer Gleichung mit einem konstanten Faktor multipliziert, wobei die Gleichungen 1) und 1a) weiter nicht geändert werden, so bedeutet nach einem bekannten Satze der analytischen Geometrie der Ausdruck

$$ax + by$$

die Entfernung des Punktes (x, y) von der Linie, deren Gleichung ist $ax + by = 0$. Entsprechende Bedeutung haben die andern Ausdrücke, die in den Gleichungen 1) und 1a) gleich Null gesetzt sind. Den erwähnten Faktoren, mit welchen die Koeffizienten dieser Gleichungen zu multiplizieren sind, kann man außerdem ein solches Vorzeichen geben, daß die Ausdrücke

$$ax + by \quad \text{und} \quad \alpha\xi + \beta v$$

positiv auf korrespondierenden Seiten der beiden Netzhauthorizonte, und ebenso die Ausdrücke

$$cx + dy \quad \text{und} \quad \gamma\xi + \delta v$$

positiv sind auf korrespondierenden Seiten der scheinbar vertikalen Meridianebenen.

Die Versuche haben uns zu dem Gesetze geführt, daß solche Punkte beider Ebenen korrespondieren, welche gleichweit von den Ebenen der Netzhauthorizonte abstehen und außerdem gleichweit von den Ebenen der scheinbar vertikalen Meridiane entfernt sind. Sind die vorausgenannten Bedingungen bezüglich der Koeffizienten in den Gleichungen 1) und 1a) erfüllt, so sind die Bedingungen der Korrespondenz:

$$\left. \begin{array}{l} ax + by = \alpha\xi + \beta v \\ cx + dy = \gamma\xi + \delta v \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{c})$$

Eine gerade Linie des einen Feldes nennen wir korrespondent einer des andern Feldes, wenn jeder Punkt der ersten einen korrespondenten Punkt in der andern findet.

Wenn wir beliebige Konstanten mit l, m, n bezeichnen, so ist die Linie:

$$l(ax + by) + m(cx + dy) + n = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1\text{d}),$$

korrespondent mit der Linie im andern Felde

$$l(\alpha \xi + \beta v) + m(\gamma \xi + \delta v) + n = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1\text{e}.$$

Denn wenn wir für irgendwelche konstanten Werte von (x, y) im zweiten Felde die Linie ziehen:

$$\alpha \xi + \beta v = ax + by \quad \ldots\ldots \quad 1\text{f}),$$

so ist für deren Schnittpunkt mit der Linie 1e) auch

$$\gamma \xi + \delta v = cx + dy,$$

wie aus der Subtraktion der Gleichungen 1d) und 1e) in diesem Falle folgt. Der Schnittpunkt von 1e) und 1f) ist also in diesem Falle korrespondent mit dem Punkte (x, y).

Es wird sich die Gleichung jeder geraden Linie

$$fx + gy + h = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1\text{g})$$

leicht auf die Form 1d) bringen lassen, indem man setzt

$$f = la + mc$$
$$g = lb + md$$
$$h = n$$

oder

$$l = \frac{df - gc}{ad - bc}$$

$$m = \frac{bf - ag}{bc - ad}$$

$$n = h,$$

wodurch die drei Koeffizienten der Gleichung 1d) eindeutig bestimmt sind. Indem man dann aus der Gleichung 1d) die Gleichung 1e) bildet, findet man die korrespondierende Linie von 1g).

Wenn wir die Gleichung 1d) dividieren durch

$$k = \sqrt{(la + mc)^2 + (lb + md)^2},$$

so kommt die Gleichung auf die Normalform der Flächengleichungen, wobei die Größe $\frac{n}{k}$ den Abstand zwischen der Fläche 1d) und dem Nullpunkte der Koordinaten bezeichnet. Setzen wir

$$\varkappa = \sqrt{(l\alpha + m\gamma)^2 + (l\beta + m\delta)^2}.$$

so bezeichnet $\frac{n}{k}$ dieselbe Distanz für die Fläche 1e). Beide Distanzen sind also nur dann gleich, wenn

$$k^2 = \varkappa^2.$$

Mit Berücksichtigung der Gleichung 1b) wird dies:

$$2\,m\,l(a\,c + b\,d) - 2\,m\,l(\alpha\,\gamma + \beta\,\delta) = 0\,.$$

Wenn nun nicht

$$a\,c + b\,d = \alpha\,\gamma + \beta\,\delta$$

ist, das heißt, wenn die beiden Ebenenpaare 1) und 1a) in jedem Auge nicht gleiche Winkel miteinander machen, so ist jene Bedingung nur zu erfüllen, wenn entweder $m = 0$ oder $l = 0$ ist, das heißt, wenn die Ebenen 1d) und 1e) entweder mit den Ebenen 1) oder mit den Ebenen 1a) zusammenfallen. Diese beiden sind durch die angegebene Eigenschaft also vor allen anderen korrespondierenden Ebenenpaaren, welche durch die Blicklinie gehen, ausgezeichnet. Wir können deshalb die genannten beiden Ebenen als Hauptmeridianebenen bezeichnen.

Berechnung korrespondierender Strecken und Winkel in beiden Augen. Legen wir der Bequemlichkeit wegen die x- und ξ-Achse in den Netzhauthorizont, so wird in den Gleichungen 1)

$$a = \alpha = 0, \qquad b = \beta = 1$$

und setzen wir die Lage der scheinbar vertikalen Meridiane, wie dies wenigstens in der Regel sehr nahehin der Fall ist, als symmetrisch voraus, so ist zu nehmen

$$\frac{d}{c} = -\frac{\delta}{\gamma} = \operatorname{tang} \varepsilon\,,$$

wo ε die Abweichung zwischen dem scheinbar und wirklich vertikalen Meridiane jedes Auges bezeichnet. Dann ist

$$c = \cos\varepsilon \qquad \gamma = \cos\varepsilon$$

$$d = -\sin\varepsilon \qquad \delta = \sin\varepsilon\,.$$

Die Gleichungen der Netzhauthorizonte sind dann

$$y = 0 \quad \text{und} \quad v = 0 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1\text{h})$$

die der scheinbar vertikalen Linien

$$x\cos\varepsilon - y\sin\varepsilon = 0 \quad \text{und} \quad \xi\cos\varepsilon + v\sin\varepsilon = 0 \quad . \; . \; . \; . \quad 1\text{i},$$

und die Gleichungen korrespondierender Linien, welche durch die Blickpunkte gehen, werden nach 1d) und 1e)

$$x\,m\cos\varepsilon + y(l - m\sin\varepsilon) = 0$$

$$\xi\,m\cos\varepsilon + v(l + m\sin\varepsilon) = 0\,.$$

Sind s und σ die Winkel, welche diese Linien mit den Achsen der x und ξ machen, so ist

$$\operatorname{tang} s = \frac{y}{x} = -\frac{m\cos\varepsilon}{l - m\sin\varepsilon}$$

$$\operatorname{tang}\sigma = \frac{v}{\xi} = -\frac{m\cos\varepsilon}{l + m\sin\varepsilon}\,,$$

woraus folgt:

$$\operatorname{tang}(\sigma - s) = \frac{2\,m^2\cos\varepsilon\sin\varepsilon}{l^2 + m^2\cos(2\,\varepsilon)}$$

$$\operatorname{tang}(\sigma + s) = -\frac{2\,m\,l\cos\varepsilon}{l^2 - m^2}\,.$$

Setzen wir nun

$$\frac{m}{l} = \operatorname{tang} \beta ,$$

so wird

$$\operatorname{tang}(\sigma - s) = \frac{\operatorname{tang}^2 \beta \cdot \sin(2\varepsilon)}{1 + \operatorname{tang}^2 \beta \cos(2\varepsilon)}$$

$$\operatorname{tang}(\sigma + s) = -\operatorname{tang}(2\beta) \cos\varepsilon$$

oder da ε ein verhältnismäßig kleiner Winkel ist und deshalb $\cos\varepsilon = \cos 2\varepsilon = 1$ und $\sin(2\varepsilon) = 2\varepsilon$ gesetzt werden kann

$$\beta = -\frac{s + \sigma}{2}$$

$$\sigma - s = 2\varepsilon \sin^2 \beta .$$

Die Winkel s und σ sind von den Netzhauthorizonten ab gezählt. Sollen sie von der Visierebene ab gerechnet werden, so muß zu der Differenz noch der Winkel γ hinzukommen, den die Netzhauthorizonte machen, und wir erhalten dann die oben gebrauchte Formel für ihre Differenz

$$\Delta = \gamma + 2\varepsilon \sin^2 \beta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.$$

Korrespondierende Visierlinien und Ebenen. Ziehen wir durch jeden einzelnen eines Paars korrespondierender Punkte und den Mittelpunkt der Visierlinien des zugehörigen Auges gerade Linien, so sind diese korrespondierende Visierlinien. Punkte, die in solchen korrespondierenden Visierlinien liegen, werden auf Deckstellen beider Netzhäute abgebildet.

Befindet sich in den bisher betrachteten Ebenen der (x, y) und (ξ, v) ein Paar korrespondierender gerader Linien verzeichnet, so liegen deren Visierlinien alle in zwei durch die Mittelpunkte der Visierlinien gehenden Ebenen, welche korrespondierende Ebenen genannt werden können.

Jedes Paar gerader Linien, welches in einem Paare korrespondierender Ebenen gezogen ist, bildet sich auf korrespondierenden Linien beider Netzhäute ab.

Wenn zwei korrespondierende Ebenen sich schneiden, so bildet sich die Schnittlinie auf korrespondierenden Linien beider Netzhäute ab.

Die Koordinaten der Mittelpunkte der Visierlinien seien

$$x = 0, \qquad y = 0, \qquad z = e$$

$$\xi = 0, \qquad v = 0, \qquad \zeta = e.$$

Nach bekannten Sätzen der analytischen Geometrie ist die Gleichung einer Ebene, welche durch den Punkt (x, y, z) geht, von der Form

$$f x + g y + \frac{h}{e}(e - z) = 0 .$$

Setzen wir $z = 0$, so kommt diese Gleichung unmittelbar auf die Form 1 g) und ist nach der dort angegebenen Methode die korrespondierende Linie in der (ξ, v) Ebene, und danach die korrespondierende Ebene zu finden.

Bilden wir die Gleichungen

$$\left.\begin{array}{ll} A = a x + b y & \mathfrak{A} = \alpha \xi + \beta v \\ B = c x + d y & \mathfrak{B} = \gamma \xi + \delta v \\ C = z - e & \mathfrak{C} = \zeta - e \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3),$$

so sind alle Ebenen, deren Gleichungen von der Form sind

$$\left.\begin{array}{l} lA + mB + nC = 0 \\ l\mathfrak{A} + m\mathfrak{B} + n\mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3a$$

korrespondierende Ebenen. Denn die Gleichungen sind von der Form derjenigen, welche durch die Mittelpunkte der Visierlinien gehen, und wenn wir $z = 0$ und $\zeta = 0$ setzen, behalten wir nach dem in 1d) und 1e) ausgesprochenen Satze die Gleichungen korrespondierender Linien übrig, die in den xy- und ξv-Ebenen liegen. Folglich sind die Ebenen korrespondierend.

Korrespondierende Visierlinien sind zu geben als Schnittlinien je zweier Paare korrespondierender Ebenen.

Gleichungen für die einfach gesehenen Geraden. Bisher haben wir die Lage der korrespondierenden Linien und Ebenen nur in bezug auf die Lage des zugehörigen Auges betrachtet, aber die Lage der Augen gegeneinander und zu den Objekten des Raumes noch gar nicht berücksichtigt. Um das letztere zu tun, denken wir uns die Lage aller Punkte und der Augen selbst auf ein gemeinsames rechtwinkeliges Koordinatensystem der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ bezogen. Wenn wir die x, y, z und ξ, v, ζ durch diese neuen Koordinaten ausdrücken, werden ihre Werte bekanntlich lineare Funktionen der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$, und ebenso auch die linear aus x, y, z, beziehlich ξ, v, ζ zusammengesetzten Größen A, B, C und $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$.

Durch jeden Raumpunkt geht im allgemeinen eine einfach gesehene gerade Linie. Der Beweis hierfür ist zu führen, wie folgt. Die Gleichungen korrespondierender Ebenen sind nach 3a)

$$\left.\begin{array}{l} lA + mB + nC = 0 \\ l\mathfrak{A} + m\mathfrak{B} + n\mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3b).$$

Beide zusammengenommen geben die Lage ihrer Schnittlinie, welche, wie schon bemerkt wurde, einfach gesehen und also eine gerade Horopterlinie wird.

Wenn man in 3a) für $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ die Koordinaten irgend eines beliebigen Punktes $\mathfrak{x}_0$, $\mathfrak{y}_0$, $\mathfrak{z}_0$ setzt, werden sich doch immer die Koeffizienten l, m, n so bestimmen lassen, daß die beiden Gleichungen 3b) erfüllt sind. Da man durch Multiplikation mit einem gemeinsamen Faktor einem der Koeffizienten einen beliebigen Wert geben kann, so sind nur zwei zu bestimmen, wozu die beiden Gleichungen im allgemeinen ausreichen. Man erhält

$$\frac{l}{n} = \frac{B_0\mathfrak{C}_0 - \mathfrak{B}_0 C_0}{A_0\mathfrak{B}_0 - \mathfrak{A}_0 B_0}$$

$$\frac{m}{n} = \frac{A_0\mathfrak{C}_0 - \mathfrak{A}_0 C_0}{\mathfrak{A}_0 B_0 - A_0\mathfrak{B}_0}.$$

Dadurch sind Werte der Verhältnisse von l, m, n bestimmt, welche den Gleichungen 3a) genügen, und zwar im allgemeinen eindeutig, vorausgesetzt, daß die obigen Brüche nicht von der Form $\frac{0}{0}$ werden, was geschieht, wenn

$$\left.\begin{array}{l} A_0\mathfrak{C}_0 = \mathfrak{A}_0 C_0 \\ B_0\mathfrak{C}_0 = \mathfrak{B}_0 C_0, \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3c.$$

woraus dann im allgemeinen folgt, daß auch

$$A_0\mathfrak{B}_0 = \mathfrak{A}_0 B_0$$

Wir werden später sehen, daß diese drei letzteren Gleichungen den Punkten der Horopterkurve entsprechen. Mit Ausnahme also dieser Punkte läßt sich durch jeden Punkt des Raumes eine und nur eine gerade und einfach gesehene Linie legen, durch die mittels der Gleichungen 3c) gegebenen Punkte aber beliebig viele.

Flächen zweiten Grades, auf denen die einfach gesehenen Linien liegen. Wenn man zwei Paare korrespondierender Flächen hat

$$\left.\begin{array}{ll} l_0 A + m_0 B + n_0 C = 0\,, & l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C} = 0 \\ l_1 A + m_1 B + n_1 C = 0\,, & l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots \quad 4),$$

so schneiden sich die beiden rechts stehenden Flächen in einer Visierlinie, die links stehenden in der korrespondierenden Visierlinie. Multipliziert man nun die unteren Gleichungen mit einem neuen Faktor k und addiert sie zu den oberen, so erhält man

$$\left.\begin{array}{l} (l_0 + k\,l_1) A + (m_0 + k\,m_1) B + (n_0 + k\,n_1) C = 0 \\ (l_0 + k\,l_1) \mathfrak{A} + (m_0 + k\,m_1) \mathfrak{B} + (n_0 + k\,n_1) \mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots \quad 4a.$$

Es sind dies die Gleichungen eines dritten Paares korrespondierender Flächen, welche aber ebenfalls durch dasselbe Paar Visierlinien gehen, wie die Flächen der Gleichungen 4). Da nämlich für die Punkte der einen Visierlinie die beiden Gleichungen links unter 4) erfüllt sind, ist auch notwendig die obere Gleichung 4a) für dieselben Punkte erfüllt, das heißt die Punkte jener Visierlinien liegen auch in der der letzteren Gleichung entsprechenden Fläche. Dasselbe gilt für die rechtsstehenden Gleichungen unter 4) und die untere unter 4a).

Die beiden Gleichungen 4a) geben zusammen eine einfach gesehene gerade Linie, da sie einzeln genommen korrespondierenden Ebenen entsprechen. Lassen wir nun den Faktor k sich kontinuierlich verändern, so wird im allgemeinen auch die einfach gesehene gerade Linie ihre Lage verändern, und zwar in kontinuierlicher Weise. Alle diese geraden Linien, welche auf solche Weise durch kontinuierliche Änderung von k sich ergeben, werden sich zu einer Fläche zusammenschließen, deren Gleichung sich ergibt, wenn wir aus den beiden Gleichungen 4a) den Faktor k eliminieren. So erhalten wir als Gleichung für die Fläche, in der die genannte Reihe einfach gesehener gerader Linien liegt:

$$\begin{array}{l} [l_0 A + m_0 B + n_0 C]\,[l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C}] \\ - [l_1 A + m_1 B + n_1 C]\,[l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C}] = 0\,. \end{array}$$

oder wenn wir die Multiplikation ausführen:

$$\begin{array}{l} (l_0 m_1 - l_1 m_0)[A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B] + (l_1 n_0 - l_0 n_1)[\mathfrak{A}C + A\mathfrak{C}] \\ + (m_0 n_1 - m_1 n_0)[B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C] = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4b). \end{array}$$

Da die Größen A, B, C, so wie $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ lineare Funktionen von $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ sind, so ist die Gleichung 4b) die einer Fläche zweiten Grades, und zwar einer solchen, in deren Oberfläche unendlich lange gerade Linien gezogen werden können. Unter den Flächen zweites Grades lassen dies zu die Hyperboloide mit einer Mantelfläche, welche im Grenzfall in Kegel, Zylinder oder auch zwei sich schneidende Ebenen übergehen können.

Vergleichen wir nun die Gleichung 4b) mit den Gleichungen 3c), welche die Punkte geben, durch welche unendlich viele einfach gesehene gerade Linien gezogen werden können:

$$\left.\begin{aligned} A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C &= 0 \\ \mathfrak{B}C - B\mathfrak{C} &= 0 \\ \mathfrak{A}B - A\mathfrak{B} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4\text{c}),$$

so sehen wir, daß auch dies Gleichungen von Hyperboloiden sind, und zwar derselben Art, wie die Fläche 4b), welche letztere bei bestimmten Werten der Koeffizienten l, m, n in je eine der Gleichungen 4c) übergehen kann.

Nehmen wir zwei von den letzteren, z. B.

$$\left.\begin{aligned} A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C &= 0 \\ B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4\text{d}),$$

so werden dieselben sich in einer Kurve schneiden müssen, da sie jedenfalls zwei Punkte gemein haben, nämlich die Mittelpunkte der Visierlinien, für deren einen

$$A = B = C = 0,$$

während für den andern

$$\mathfrak{A} = \mathfrak{B} = \mathfrak{C} = 0$$

und jede dieser beiden Annahmen den beiden Flächengleichungen genügt. Außerdem ist leicht zu sehen, daß auch die Annahme

$$C = \mathfrak{C} = 0$$

den beiden Flächengleichungen genügt, das heißt, die gerade Schnittlinie der beiden Flächen $C = 0$ und $\mathfrak{C} = 0$ muß beiden Hyperboloiden angehören, also mit zu ihrer gesamten Schnittlinie gehören. Diese Schnittlinie setzt sich also zusammen aus einer geraden Linie $C = 0$, $\mathfrak{C} = 0$, und einem andern Stück, welches im allgemeinen eine Kurve doppelter Krümmung sein wird.

Aus den beiden Gleichungen 4d) können wir $\mathfrak{C}$ eliminieren, indem wir die obere mit B, die untere mit A multiplizieren und addieren. Wir erhalten

$$(A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B)C = 0.$$

Wenn also C nicht gleich Null ist, so folgt aus dieser Elimination die dritte der Gleichungen 4c)

$$\mathfrak{A}B - A\mathfrak{B} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4\text{e}).$$

Sollte C gleich Null sein, so würde nach 4d) entweder auch $\mathfrak{C} = 0$ sein müssen, oder gleichzeitig $A = B = 0$. Nur im letzteren Falle würde die Gleichung 4e) gültig sein; die Bedingungen $A = B = C = 0$ gehören dem Mittelpunkte der Visierlinien des einen Auges an.

Daraus folgt, daß für die Punkte der Schnittlinie der Flächen 4d), welche nicht der geraden Linie $C = \mathfrak{C} = 0$ angehören, auch die Gleichung 4e) erfüllt ist, daß also die drei Flächen 4e) sich in ein und derselben Kurve doppelter Krümmung schneiden. Je zwei der Flächen haben immer noch eine gerade Schnittlinie, die aber im allgemeinen nicht der dritten Fläche angehört.

Wenn man nun die Gleichungen dreier Flächen hat

$$X = 0 \qquad Y = 0 \qquad Z = 0,$$

die eine gemeinsame Schnittlinie besitzen, so wird auch jede Fläche, deren Gleichung von der Form ist

$$l X + m Y + n Z = 0 ,$$

durch dieselbe Schnittlinie gehen. Da nämlich für die Punkte der Schnittlinie die ersteren drei Gleichungen erfüllt sind, ist für dieselben auch notwendig die letztere erfüllt.

Nun ist die Gleichung 4b) in der angegebenen Weise aus den drei Gleichungen 4c) zusammengesetzt. Folglich gehen alle die unendlich vielen Hyperboloide, auf denen die einfach gesehenen Linien liegen, durch die gemeinsame Schnittkurve der Gleichungen 4c).

Diese Kurve ist eine sogenannte **Kurve dritten Grades**, das heißt, sie kann von einer und derselben Ebene in drei Punkten geschnitten werden. Da nämlich die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades wie zum Beispiel der beiden Flächen 4d) im allgemeinen vom vierten Grade ist und in vier oder zwei Punkten von einer Ebene geschnitten werden kann, einer dieser Schnittpunkte aber notwendig der geraden Linie angehört (Parallelismus wird als Schneidung im Unendlichen betrachtet), so bleiben nur drei Schnittpunkte oder einer für die Kurve. So schneidet z. B. die Visierebene der Horopterkurve im Fixationspunkte und in den Mittelpunkten beider Augen. Denkt man sich die schneidende Ebene unendlich weit entfernt, so wird sie auch in ein oder drei Punkten schneiden müssen, was dann ein oder drei Paare nach entgegengesetzten Richtungen in das Unendliche auslaufender Zweige der Kurve gibt.

Die Kurve dritten Grades ist Horopterkurve, das heißt, in ihr schneiden sich korrespondierende Visierlinien. Die drei Gleichungen 4c) können wir nämlich auch schreiben

$$\left.\frac{A}{\mathfrak{A}} = \frac{B}{\mathfrak{B}} = \frac{C}{\mathfrak{C}}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4\text{f}).$$

Nun sind die Gleichungen 4) die Gleichungen zweier korrespondierender Visierlinien. Nehmen wir die der einen

$$\left.\begin{aligned} l_0 A + m_0 B + n_0 C = 0 \\ l_1 A + m_1 B + n_1 C = 0 \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4\text{g})$$

und setzen voraus, daß sie durch einen Punkt der Kurve dritten Grades geht, in welchem dann die Gleichungen 4f) erfüllt sind, so folgt: wenn wir die beiden Gleichungen 4g) mit $\frac{\mathfrak{A}}{A}$ multiplizieren mit Berücksichtigung von 4f), daß für denselben Punkt auch sei

$$l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C} = 0$$

$$l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C} = 0 ,$$

daß also derselbe Punkt auch der korrespondierenden Visierlinie angehört. Es schneiden sich also korrespondierende Visierlinien in je einem Punkte der gemeinsamen Schnittlinie der Flächen 4c). Diese ist die **Horopterkurve**. Daß nicht alle Stücke dieser Kurve auch gleichzeitig **Horopter** sind, ist schon oben erwähnt worden.

Kegel zweiten Grades, welche durch die Horopterkurve gehen. Wenn die beiden korrespondierenden Visierlinien der Gleichungen 4) sich in einem Punkte schneiden, der alsdann der Horopterkurve angehört, so gehen

auch alle die durch die beiden Visierlinien gelegten Ebenen der Gleichungen 4a durch denselben Punkt, folglich auch alle Schnittlinien dieser Ebenen, aus denen sich die Oberfläche zweiten Grades zusammensetzt. Eine Fläche zweiten Grades, in der ein System unendlich langer gerader Linien liegt, die alle durch einen und denselben Punkt gehen, ist ein Kegel zweiten Grades.

Jeder Punkt der Horopterkurve ist also die Spitze eines Kegels zweiten Grades, in dessen Mantel die ganze Horopterkurve liegt. Dieser Kegel kann in besonderen Fällen in einen Zylinder (Kegel mit unendlich entfernter Spitze) oder in ein Paar sich schneidender Ebenen (Kegel, dessen elliptische Basis eine unendlich lange Achse hat) übergehen.

Jede gerade Linie, welche zwei Punkte der Horopterkurve schneidet, gehört zwei solchen Kegeln an und wird also einfach gesehen.

Wenn sich einer der Kegel in ein Ebenenpaar verwandeln kann, so besteht die Horopterkurve aus einem ebenen Kegelschnitt und einer geraden Linie, die den Kegelschnitt in einem Punkte schneidet. Denn man denke sich zur Konstruktion der Horopterkurve außer dem einen Kegel, der durch die beiden Ebenen dargestellt wird, noch einen zweiten, dessen Spitze in einer der beiden Ebenen liegen muß, so schneiden diese sich in zwei geraden Linien und einem Kegelschnitt. Die eine Gerade aber gehört nicht zur Horopterkurve.

Einzelne Fälle. Um nun die wirkliche Berechnung der Horopterkurve in einzelnen Fällen ausführen zu können, müssen wir die Ausdrücke A, B, C und $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ wirklich bilden als Funktionen von $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$. Wir nehmen an, daß der Fixationspunkt der Nullpunkt dieses letzteren Systems sei, die Visierebene die Ebene der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, die $\mathfrak{z}$ positiv nach oben steigend. Die Halbierungslinie des Konvergenzwinkels der beiden Gesichtslinien sei die Achse der $\mathfrak{x}$, der Konvergenzwinkel selbst sei 2γ, die Entfernung des Mittelpunkts der Visierlinien im rechten Auge vom Fixationspunkte sei a, die des linken a_1. Dann sind die Koordinaten für den Mittelpunkt der Visierlinien

im rechten Auge: $\mathfrak{x} = a \cos\gamma$, $\mathfrak{y} = a \sin\gamma$, $\mathfrak{z} = 0$
im linken Auge: $\mathfrak{x} = a_1 \cos\gamma$, $\mathfrak{y} = -a_1 \sin\gamma$, $\mathfrak{z} = 0$.

Nehmen wir nun ein zweites Koordinatensystem zu Hilfe: $\mathfrak{x}_1$, $\mathfrak{y}_1$, $\mathfrak{z}_1$, welches gegen das erste um die $\mathfrak{z}$-Achse und den Winkel γ gedreht ist, so daß seine $\mathfrak{x}_1$-Achse mit der Gesichtslinie des rechten Auges zusammenfällt, so haben wir

$$\mathfrak{x}_1 = \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma$$
$$\mathfrak{y}_1 = -\mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{y}\cos\gamma$$
$$\mathfrak{z}_1 = \mathfrak{z},$$

was den beiden Bedingungen genügt, daß

$$\mathfrak{x}_1^2 + \mathfrak{y}_1^2 = \mathfrak{x}^2 + \mathfrak{y}^2$$

und daß für $\mathfrak{x}_1 = a$, $\mathfrak{y}_1 = 0$, die oben angegebenen Werte der Koordinaten für den Mittelpunkt des rechten Auges sich finden.

In dem System $(\mathfrak{x}_1 \mathfrak{y}_1 \mathfrak{z}_1)$ fällt die Achse der $\mathfrak{x}_1$ zusammen mit der Achse der z in dem oben in den Gleichungen 1i bis 1i gebrauchten System der x, y, z, so daß

$$\mathfrak{x}_1 = a - z + e.$$

Das System der xyz ist gedreht gegen das erstere um den Winkel ϑ, den der Netzhauthorizont mit der Visierebene macht; also ist

$$x = \mathfrak{y}_1 \cos\vartheta - \mathfrak{z}_1 \sin\vartheta$$
$$y = \mathfrak{y}_1 \sin\vartheta + \mathfrak{z}_1 \cos\vartheta\,,$$

wobei der Winkel ϑ positiv gerechnet ist für eine Drehung des oberen Endes des senkrechten Meridians nach rechts herum; also beim Blick nach links oben und rechts unten. Demgemäß ist

$$\left.\begin{aligned} x &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\vartheta - \mathfrak{z}\sin\vartheta \\ y &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{z}\cos\vartheta \\ z &= -\mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma + a + e \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5.$$

Daraus bilden sich nun nach Gleichungen 3) mit Berücksichtigung von 1h) und 1i), sowie der dort vorausgeschickten Festsetzungen, die Ausdrücke:

$$\left.\begin{aligned} A = y &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{z}\cos\vartheta \\ B = x\cos\varepsilon &- y\sin\varepsilon \\ &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) - \mathfrak{z}\sin(\vartheta+\varepsilon) \\ C = z - e &= a - \mathfrak{x}\cos\gamma - \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 5a.$$

In ähnlicher Weise finden sich die Ausdrücke $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, wenn ϑ' der Raddrehungswinkel für das linke Auge ist:

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{A} &= +\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta_1 + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta_1 + \mathfrak{z}\cos\vartheta_1 \\ \mathfrak{B} &= \mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta_1-\varepsilon) + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos(\vartheta_1-\varepsilon) - \mathfrak{z}\sin(\vartheta_1-\varepsilon) \\ \mathfrak{C} &= a_1 - \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \quad . \quad 5b.$$

Vereinfachte Formen der Horopterkurve. Solche finden sich namentlich in den Fällen, wo ein Paar korrespondierender Ebenen ganz ineinander fällt. Dann schneidet sich nämlich notwendig jede in dieser Ebene liegende Visierlinie des einen Auges mit der korrespondierenden des andern und gibt einen Punkt der Horopterkurve, der in der Ebene liegt. Sollten die Visierlinien parallel laufen, so geben sie unendlich entfernte Punkte dieser Kurve. Dann ist also ein Teil der Horopterkurve eine ebene Kurve oder eine gerade Linie. Ist das erstere der Fall, und machen wir irgend einen Punkt dieser Kurve zum Mittelpunkt eines durch die Horopterkurve gelegten Kegels, so wird ein Teil dieser Kegelfläche eine Ebene, der Rest der Kegelfläche kann dann nur eine zweite Ebene sein. Denn nur der Grenzfall, wo der Kegel in zwei sich schneidende Ebenen übergeht, erlaubt, daß ein Teil der Kegeloberfläche eben sei. Wenn diese andern Ebenen, die nicht durch die dem Horopter angehörige ebene Kurve gehen, eine gemeinsame Schnittlinie haben, so kann diese nur eine gerade Linie sein, die durch einen Punkt der erwähnten ebenen Kurve gehen muß. Zugleich folgt, daß die Kurve eine Kurve zweiten Grades sein muß, denn nur unter dieser Bedingung können die Kegel, welche ihre Spitze in der geraden Linie haben, Kegel zweiten Grades sein.

Ist zweitens die Schnittkurve der korrespondierenden Visierlinien eine gerade Linie, so folgt, daß jeder Kegel, der einen außerhalb dieser geraden Linie liegenden Teil der Horopterkurve zur Spitze hat, einen ebenen Teil hat, folglich aus zwei Ebenen besteht, und daß daher der Rest der Horopterkurve eine ebene Kurve sein müsse.

Auch ist leicht einzusehen, daß, wenn die Horopterkurve aus einer geraden Linie und einem Kegelschnitt besteht, die Augenmittelpunkte in dem letzteren

liegen müssen und die Ebene desselben ein korrespondierendes und zusammenfallendes Ebenenpaar beider Augen darstellt. Denn es kann nicht ein Auge in der Kurve, ein anderes in der geraden Linie liegen; sonst würde ein Bündel von Visierlinien des ersteren, welches nach den Punkten der Kurve geht und daher in einer Ebene liegt, im zweiten in einer gekrümmten Kegeloberfläche liegen, was nicht angeht. Und sollten beide Augen in der geraden Linie liegen, so müßte diese ein Paar korrespondierender Visierlinien vertreten, und gibt es dann außerhalb dieser geraden Linie noch irgend einen Punkt der Horopterkurve, z. B. den Fixationspunkt, so wäre die durch ihn und die Augen gelegte Ebene Vertreterin eines korrespondierenden Ebenenpaars und müßte eine Horopterkurve enthalten.

Die Bedingung für die Zusammensetzung der Horopterkurve aus einem ebenen Kegelschnitt und einer diesen schneidenden geraden Linie ist also, daß es Werte von l, m, n gibt, für welche die Gleichungen

$$l A + m B + n C = 0$$

$$l \mathfrak{A} + m \mathfrak{B} + n \mathfrak{C} = 0$$

identisch werden. Bringt man mittels der Gleichungen 5a) und 5b) diese Gleichungen auf die Form

$$f \mathfrak{x} + f_1 \mathfrak{y} + f_2 \mathfrak{z} + f_3 = 0$$

$$\varphi \mathfrak{x} + \varphi_1 \mathfrak{y} + \varphi_2 \mathfrak{z} + \varphi_3 = 0,$$

so muß sein

$$\frac{f}{\varphi} = \frac{f_1}{\varphi_1} = \frac{f_2}{\varphi_2} = \frac{f_3}{\varphi_3}.$$

Der letzte Bruch ist unabhängig von l, m, n; in den drei ersten sind Zähler und Nenner lineare Funktionen von l, m, n. Indem man jeden der drei ersten Brüche dem letzten gleich setzt, erhält man drei lineare Gleichungen für l, m, n ohne konstantes Glied, und daraus folgt, daß die Determinante der Koeffizienten von l, m, n gleich Null sein muß. Dies gibt eine Gleichung zwischen den Größen a, a_1, ϑ, ϑ_1 und γ, welche erfüllt sein muß, wenn die Horopterkurve die oben angegebene Gestalt erhalten soll. Es ist nicht nötig, diese Rechnung hier durchzuführen, da uns nur diejenigen Stellungen der Augen näher interessieren, die nach dem LISTINGschen Gesetze möglich sind.

Geometrisch läßt sich die Bedingung hierfür folgendermaßen ausdrücken. Bezeichnen wir die Linie, welche die beiden Mittelpunkte der Visierlinien verbindet, mit F. Diese Linie kann sowohl als eine der Visierlinien des rechten Auges, wie als eine des linken betrachtet werden. Im ersteren Sinne muß es zu ihr eine korrespondierende Visierlinie H im linken Auge geben, im zweiten Sinne eine korrespondierende G im rechten Auge. Wenn G und H sich schneiden, so liegen sie mit F in einer Ebene, welche dann für beide Augen korrespondierend liegt, da zwei Paar korrespondierender Visierlinien in ihr liegen, F und G für das rechte, F und H für das linke Auge. Bei jeder Stellung der Augen wird es also möglich sein, durch Drehung des einen um seine Gesichtslinie eine Stellung herbeizuführen, welche der Horopterkurve die gewünschte einfache Gestalt gibt.

Für Augen, welche dem Gesetze von LISTING folgen, symmetrisch gebildet sind und deren Netzhauthorizonte bei parallelen Blicklinien in der Visierebene liegen, ist es klar, daß die genannte Bedingung erfüllt ist, erstens bei den

symmetrischen Stellungen der Augen, wo die Linien G und H auch symmetrisch liegen und sich daher in der Medianebene schneiden müssen, zweitens wenn die Visierebene sich in ihrer Primärstellung befindet, weil dann die einander korrespondierenden Netzhauthorizonte in ihr liegen. Es sind dies übrigens theoretisch nicht die einzigen Fälle der Art, sondern es würden für Augen, die dem Listingschen Gesetze genau folgen, in nach unten und seitlich gerichteten Stellungen noch gewisse sehr große Entfernungen des Fixationspunktes existieren, in denen die Visierebene für beide Augen korrespondierend wäre und daher eine ebene Ellipse als Horopterkurve enthalten müßte. Von irgend welcher praktischer Wichtigkeit sind aber diese Fälle nicht, da bei sehr großen Entfernungen des Fixationspunktes überhaupt die Beobachtungen über die Lage der einfach gesehenen Punkte zu unbestimmt werden. In Augen, wo die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane fehlt, rücken die erwähnten Lagen des Fixationspunktes in unendliche Entfernung hinaus.

Mit Auslassung kleiner Größen ist in solchen Fällen die Entfernung ϱ des Fixationspunktes von dem Mittelpunkte eines mitten zwischen den Augen gelegenen ideellen Auges, wenn α der Erhebungswinkel, γ der Seitenwendungswinkel dieses Auges wäre, a der halbe Abstand der wirklichen Augen, ε die halbe Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane voneinander

$$\varrho = \pm \frac{a \cos \gamma}{\sin \varepsilon \sin \beta \cos \beta}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \,.$$

In der Nähe der Medianebene, wo $\gamma = 0$ und in der Nähe der Primärlage der Visierebene, wo $\alpha = 0$, wird $\beta = 0$ und ϱ unendlich lang. Positive Werte hat es nur für ein negatives α, also unterhalb der Visierebene.

Wir wollen jetzt die beiden erst erwähnten Fälle behandeln, in denen der Horopter aus einer geraden Linie und einer ebenen Kurve besteht, Fälle, welche eine gewisse Wichtigkeit für die Beobachtungen haben.

A. Der Fixationspunkt liegt in der Medianebene in unendlicher Entfernung. Dann wird in den Gleichungen 5a) und 5b)

$$a = a_1 \qquad \vartheta = -\vartheta_1$$

$$\left.\begin{aligned}
A &= -\mathfrak{x} \sin \gamma \sin \vartheta + \mathfrak{y} \cos \gamma \sin \vartheta + \mathfrak{z} \cos \vartheta \\
B &= -\mathfrak{x} \sin \gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{y} \cos \gamma \cos \vartheta + \varepsilon - \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) \\
C &= a - \mathfrak{x} \cos \gamma - \mathfrak{y} \sin \gamma \\
\mathfrak{A} &= -\mathfrak{x} \sin \gamma \sin \vartheta - \mathfrak{y} \cos \gamma \sin \vartheta + \mathfrak{z} \cos \vartheta \\
\mathfrak{B} &= \mathfrak{x} \sin \gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{y} \cos \gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{z} \sin \vartheta + \varepsilon \\
\mathfrak{C} &= a - \mathfrak{x} \cos \gamma + \mathfrak{y} \sin \gamma
\end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad 6).$$

Zusammenfallende korrespondierende Ebenen finden sich, wenn wir setzen

$$A \sin \gamma + C \cos \gamma \sin \vartheta = 0$$

$$\mathfrak{A} \sin \gamma + \mathfrak{C} \cos \gamma \sin \vartheta = 0$$

denn beide Gleichungen geben identisch, vorausgesetzt, daß nicht $\sin \gamma$ und $\sin \vartheta$ gleichzeitig gleich Null sind:

$$\mathfrak{x} \sin \vartheta - \mathfrak{z} \sin \gamma \cos \vartheta - a \cos \gamma \sin \vartheta = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6\text{a}.$$

Dies ist also die Ebene des Kegelschnitts. Ferner wird für

$$\mathfrak{y} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) = -\mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6\text{b})$$

$$A = \mathfrak{A} = -\mathfrak{x} \sin\gamma \sin\vartheta + \mathfrak{z} \cos\vartheta$$

$$B = \mathfrak{B} = 0$$

$$C = \mathfrak{C} = a - \mathfrak{x} \cos\gamma \,.$$

Also sind die Punkte der durch die Gleichungen 6b) gegebenen geradenen Linie für beide Augen korrespondierend, und jene Linie ist die gerade Horopterlinie.

Ihr parallel müssen die Kanten des Zylinders sein, auf dem die Horopterlinie liegt, und diejenigen Ebenen, die sich in den Zylinderkanten schneiden. Bildet man die Gleichung der korrespondierenden Ebenen:

$$A \cos\gamma \sin(\vartheta + \varepsilon) - C \sin\gamma \cos\varepsilon = 0$$

$$\mathfrak{A} \cos\gamma \sin(\vartheta + \varepsilon) - \mathfrak{C} \sin\gamma \cos\varepsilon = 0 \,,$$

so reduzieren sich diese für $\mathfrak{y} = 0$ auf

$$\frac{a \operatorname{tang}\gamma \cos\varepsilon}{\cos\vartheta} - \mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) - \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) = 0 \,.$$

Ihre Schnittlinie ist also, wie man aus der Vergleichung mit 6b) sieht, der geraden Horopterlinie parallel und liegt wie diese in der Medianebene.

Andererseits schneiden sich in der geraden Horopterlinie gemäß 6b) die Ebenen

$$B = \mathfrak{B} = 0$$

und die korrespondierenden Ebenen

$$A \cos\gamma \sin(\vartheta + \varepsilon) + \varkappa B - C \sin\gamma \cos\varepsilon = 0$$

$$\mathfrak{A} \cos\gamma \sin(\vartheta + \varepsilon) + \varkappa \mathfrak{B} - \mathfrak{C} \sin\gamma \cos\varepsilon = 0$$

schneiden sich also ebenfalls in Linien, die der geraden Horopterlinie parallel sind. Eliminiert man aus ihnen $\varkappa$, so erhält man

$$(A\mathfrak{B} - B\mathfrak{A}) \cos\gamma \sin(\vartheta + \varepsilon) - (\mathfrak{B} C - B\mathfrak{C}) \sin\gamma \cos\varepsilon = 0$$

als Gleichung des Zylinders. Diese Gleichung reduziert, gibt:

$$\left.\begin{aligned} \frac{a^2 \sin^2\gamma \cos^2\varepsilon}{4 \cos^2\gamma \cos^2\vartheta} &= \mathfrak{y}^2 \left[\sin^2\gamma \cos^2(\vartheta + \varepsilon) + \frac{\sin\vartheta \cdot \sin 2(\vartheta + \varepsilon)}{2 \cos\vartheta}\right] \\ &+ \left[\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) - \frac{a \sin\gamma \cos\varepsilon}{2 \cos\gamma \cos\vartheta}\right]^2 \end{aligned}\right\} \quad 6\text{c}).$$

Es ist dies die Gleichung eines Zylinders, welcher die Ebenen $\mathfrak{z} =$ Konst. schneidet in Kegelschnitten, deren $\mathfrak{x}$-Achse stets reell ist, nämlich

$$X = \frac{a \cos\varepsilon}{2 \cos\gamma \vartheta \cos(\vartheta - \varepsilon)} \,.$$

Die $\mathfrak{y}$-Achse dagegen ist dies nicht notwendig, ihr Quadrat ist

$$Y^2 = \frac{a^2 \operatorname{tang}^2\gamma \cos^2\varepsilon}{4 \cos\vartheta \cos(\vartheta + \varepsilon) [\sin^2\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) \cos\vartheta + \sin\vartheta \sin(\vartheta + \varepsilon)]} \,.$$

In diesem Ausdrucke werden $\cos\vartheta$ und $\cos(\vartheta + \varepsilon)$ für die ausführbaren Augenbewegungen immer positiv sein. Wenn aber $\operatorname{tang}\vartheta \operatorname{tang}(\vartheta + \varepsilon)$ negativ

wird und sein absoluter Wert dabei größer als der von $\sin^2\gamma$, so wird Y imaginär und der Schnitt eine Hyperbel. Da ε der Regel nach einen kleinen positiven Wert hat, so muß ϑ zu diesem Zwecke noch kleinere negative Werte haben, was nur bei abwärts gerichteten Gesichtslinien und weiter Entfernung des Fixationspunktes eintreten kann.

Die Y-Achse dieses in der Visierebene liegenden Kegelschnitts fällt mit der der ebenen Horopterkurve zusammen; um die mediane Achse der letzteren zu finden, setze man den Wert von $\mathfrak{z}$ aus der Gleichung 6a) in 6c) und zugleich $\mathfrak{y} = 0$, so kann man für das eine und andere Ende der betreffenden Achse die Koordinaten $\mathfrak{x}_0$, $\mathfrak{z}_0$ und $\mathfrak{x}_1$, $\mathfrak{z}_1$ finden. Die Größe der stets reellen Achse X_1 ist dann gegeben durch die Gleichung

$$X_1^2 = \frac{1}{4}(\mathfrak{x}_1 - \mathfrak{x}_0)^2 + \frac{1}{4}(\mathfrak{z}_1 - \mathfrak{z}_0)^2$$

$$= \frac{a^2 \sin^2\gamma \cos^2\varepsilon (\sin^2\gamma \cos^2\vartheta + \sin^2\vartheta)}{4\cos^2\gamma \cos^2\vartheta [\sin^2\gamma \cos\vartheta \cos(\vartheta + \varepsilon) + \sin\vartheta \cdot \sin(\vartheta + \varepsilon)]^2}$$

und es findet sich

$$\frac{X_1^2}{Y^2} = \frac{\sin^2\gamma + \operatorname{tang}^2\vartheta}{\sin^2\gamma + \operatorname{tang}\vartheta \cdot \operatorname{tang}(\vartheta + \varepsilon)}.$$

Man kann zur Konstruktion der Horopterkurve statt des bisher betrachteten Zylinders auch den Kegel des Vertikalhoropters

$$B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C = 0$$

benutzen, oder

$$[\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon)][a - \mathfrak{x}\cos\gamma] - \mathfrak{y}^2 \cos\gamma \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) = 0$$

für $\mathfrak{z} = 0$, das heißt in der Visierebene, ist die Schnittlinie ein Kreis, gegeben durch folgende Gleichung:

$$\left(\mathfrak{x} - \frac{a}{2\cos\gamma}\right)^2 + \mathfrak{y}^2 = \frac{a^2}{4\cos^2\gamma}.$$

Dieser Kreis geht durch die Punkte

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0$$

$$\mathfrak{x} = \frac{a}{\cos\gamma} \qquad \mathfrak{y} = 0$$

$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = a\sin\gamma$$

$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = -a\sin\gamma.$$

Die zwei ersten sind der Fixationspunkt und der ihm diametral gegenüber liegende Punkt, die beiden anderen sind die Mittelpunkte beider Augen. Dadurch ist dieser Kreis gegeben.

Der Kegel schneidet die Medianebene, $\mathfrak{y} = 0$, in den beiden Linien

$$\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) = -\mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon)$$

$$\mathfrak{x} \cos\gamma = a.$$

Ersteres ist die gerade Horopterlinie, die zweite ist senkrecht zur Visierebene und schneidet diese in dem dem Fixationspunkt diametral gegenüberliegenden Punkte des Kreises. Die Ordinaten der Spitze des Kegels sind also

$$\mathfrak{x} = \frac{a}{\cos\gamma}$$

$$\mathfrak{z} = -a \operatorname{tang}\gamma \cdot \operatorname{cotang}(\vartheta + \varepsilon).$$

Um die Lage der betreffenden Linien und Ebenen zu finden für Augen, welche dem Gesetze von LISTING folgen, setzen wir den Erhebungswinkel zwischen der Primärlage der Visierebene und ihrer aktuellen Lage gleich β, und haben dann

$$\operatorname{tang}\vartheta = \frac{\sin\gamma \sin\beta}{\cos\gamma + \cos\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7).$$

Die Gleichung 6a) für die Ebene der Horopterkurve wird dann

$$(\mathfrak{x} - a\cos\gamma) - \mathfrak{z}\,\frac{\cos\gamma + \cos\beta}{\sin\beta} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7a).$$

Die Gleichungen für die Primärrichtung der Gesichtslinien sind unter diesen Umständen:

$$\mathfrak{y} = \pm a \sin\gamma \quad \text{und} \quad \mathfrak{z} = (\mathfrak{x} - a\cos\gamma)\operatorname{tang}\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7b).$$

Die Gleichungen für die aktuellen Lagen der Blicklinien sind

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{y} = \pm \mathfrak{x}\operatorname{tang}\gamma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7c).$$

Der Fixationspunkt ist auf den letzteren Linien in der Entfernung a von den Mittelpunkten der Augen. Schneiden wir auch auf den Linien 7b) einen Punkt in der Entfernung a vom Mittelpunkte des betreffenden Auges ab, so sind dessen Koordinaten

$$\mathfrak{x} = a(\cos\gamma - \cos\beta), \qquad \mathfrak{y} = \pm a\sin\gamma, \qquad \mathfrak{z} = -a\sin\beta \quad . \quad . \quad 7d).$$

Die Koordinaten eines Punktes dagegen, der in der Mitte zwischen diesem Punkte 7d) und dem Fixationspunkte liegt, für welchen letzteren

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0 \qquad \mathfrak{z} = 0$$

sind halb so groß als die Koordinaten 7d), also

$$\mathfrak{x} = \frac{1}{2}a(\cos\gamma - \cos\beta), \qquad \mathfrak{y} = \pm\frac{1}{2}a\sin\gamma, \qquad \mathfrak{z} = -\frac{1}{2}a\sin\beta \quad . \quad 7e).$$

Diese letzteren Werte erfüllen nun die Gleichung 7a) und es liegen also die beiden Punkte 7e) in der Ebene der Horopterkurve.

Die Ebene des Kegelschnitts, der der Horopterkurve angehört, wird also bei medianem Fixationspunkte gefunden, wenn man die Winkel, welche die primäre und die aktuelle Lage jeder Blicklinie bilden, halbiert und durch die Halbierungslinie eine Ebene legt. Dieser Umstand ist bei der Konstruktion auf Seite 351, Fig. 70, benutzt.

Wenn man ferner durch den Mittelpunkt jedes Auges eine Ebene legt, senkrecht zu der Verbindungslinie desselben Punktes mit dem zugehörigen Punkte der Gleichungen 7e), so ist deren Gleichung

$$(\mathfrak{x} - a\cos\gamma)(\cos\gamma + \cos\beta) - (a\sin\gamma \mp \mathfrak{y})\sin\gamma + \mathfrak{z}\sin\beta = 0 \quad . \quad . \quad 7f).$$

Nimmt man hierzu noch die Gleichung einer Ebene, welche in der Entfernung $-a\sin\gamma\operatorname{cotang}\varepsilon$ unterhalb der Primärlage der Visierebene 7d) liegt und deren Gleichung ist:

$$\mathfrak{z}\cdot\cos\beta + a\operatorname{cotang}\varepsilon\cdot\sin\gamma = (\mathfrak{x} - a\cos\gamma)\sin\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7g),$$

so ergibt sich, daß die Ebenen, welche durch die gerade Horopterlinie gehen, nämlich

$$\mathfrak{x} \sin\gamma + \mathfrak{z} \operatorname{tang} \vartheta + \varepsilon = 0, \qquad \mathfrak{y} = 0$$

und die beiden Ebenen 7f) und 7g) durch einen Punkt gehen, da die Werte von $\mathfrak{x}\,\mathfrak{y}\,\mathfrak{z}$ aus je drei dieser Gleichungen, mit Berücksichtigung von 7) in die vierte gesetzt, diese identisch machen. Darauf beruht die Konstruktion der geraden Horopterlinie oben in Fig. 71.

B. Fixationspunkt in der Mittelebene in unendlicher Entfernung. Eine besondere Untersuchung verdient noch der Fall, wenn $\sin\gamma$ und $\sin\vartheta$ gleichzeitig gleich Null sind, ein Fall, den wir oben bei der Gleichung 6a) von der Untersuchung ausschließen mußten. Es sind alsdann die Gesichtslinien einander parallel in die Ferne gerichtet. Die Entfernung a des Fixationspunktes und die Koordinate $\mathfrak{x}$ wird unendlich groß, aber die Größe $a \sin\gamma$, welche die halbe Entfernung der Augen ist, bleibt konstant, wir wollen sie mit b bezeichnen, und $\mathfrak{x} - a$ mit $\mathfrak{x}$. Dann wird

$$A = \mathfrak{z} \qquad\qquad \mathfrak{A} = \mathfrak{z}$$

$$B = -b\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\varepsilon - \mathfrak{z}\sin\varepsilon \qquad\qquad \mathfrak{B} = b\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon$$

$$C = -\mathfrak{x} \qquad\qquad \mathfrak{C} = -\mathfrak{x}.$$

Dann sind also die Bedingungen der Korrespondenz, daß

$$A = \mathfrak{A}, \qquad B = \mathfrak{B}, \qquad C = \mathfrak{C}$$

vollständig erfüllt für alle Punkte für welche

$$b\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon = 0.$$

Dies sind die Punkte einer Ebene, die in der Entfernung $-b \operatorname{cotang}\varepsilon$ unterhalb der Visierebene liegt. Diese bildet also in diesen Fällen den Horopter.

C. Der Fixationspunkt liegt in der Primärlage der Visierebene. Nach dem Listingschen Gesetze wird

$$\vartheta = \vartheta' = 0$$

und also nach 5a) und 5b)

$$\left.\begin{aligned} A &= \mathfrak{z} \\ B &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon - \mathfrak{z}\sin\varepsilon \\ C &= a - \mathfrak{x}\cos\gamma - \mathfrak{y}\sin\gamma \\ \mathfrak{A} &= \mathfrak{z} \\ \mathfrak{B} &= \mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon \\ \mathfrak{C} &= a_1 - \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \; 8).$$

Der Kegel

$$A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C = 0$$

wird

$$\mathfrak{z}[a_1 - a + 2\mathfrak{y}\sin\gamma] = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \; 8a)$$

und zerfällt also in die beiden Ebenen

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{y} = \frac{a - a_1}{2\sin\gamma} \quad \ldots\ldots\ldots \; 8b).$$

Die Fläche

$$A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B = 0$$

wird

$$2\,\mathfrak{z}\,[\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon] = 0$$

und zerfällt also in die beiden Ebenen

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{z}\,\mathrm{tang}\,\varepsilon = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8\,c).$$

Die Fläche endlich

$$B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}\,C = 0$$

wird

$$-(\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon)(a_1 + a - 2\,\mathfrak{x}\cos\gamma) + 2\,\mathfrak{y}^2\cos\gamma\sin\gamma\cos\varepsilon$$
$$+ (a_1 - a)\,\mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon = 0\,,$$

was die Gleichung eines Hyperboloids ist. Die Schnittlinie desselben mit der Ebene $\mathfrak{z} = 0$ ist

$$\left(\mathfrak{x} - \frac{a + a_1}{4\cos\gamma}\right)^2 + \left(\mathfrak{y} + \frac{a_1 - a}{4\sin\gamma}\right)^2 = \frac{1}{4}\cdot\frac{a^2 + a_1^2 - 2\,a\,a_1\cos 2\gamma}{(\sin 2\gamma)^2}$$

ein Kreis, welcher durch die Punkte

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0$$
$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = a\sin\gamma$$
$$\mathfrak{x} = a_1\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = -\,a_1\sin\gamma$$

hindurchgeht, der MÜLLERsche Horopterkreis.

Die gerade Linie des Horopters ist demgemäß die durch die beiden unter 8 b) und 8 c) aufgeführten Gleichungen gegebene Linie

$$\mathfrak{y} = \frac{a - a_1}{2\sin\gamma} \quad \text{und} \quad \mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{z}\,\mathrm{tang}\,\varepsilon = 0\,.$$

Ihr Schnittpunkt mit der Visierebene liegt auch im Horopterkreise, sie läuft der Medianebene $\mathfrak{y} = 0$ parallel. Die Entfernung des Schnittpunktes von den beiden Augenmittelpunkten ist die gleiche, nämlich

$$\frac{\sqrt{a^2 - 2\,a\,a_1\cos 2\gamma + a_1^2}}{2\sin\gamma} = \frac{b}{\sin\gamma}\,,$$

wenn wir die halbe Distanz der Augen voneinander mit b bezeichnen. Macht man

$$\mathfrak{x} = \frac{b}{\sin\gamma}\,,$$

so wird

$$\mathfrak{z} = -\,\frac{b}{\mathrm{tang}\,\varepsilon}\,.$$

Diese letztere Größe ist aber die Entfernung der Horopterfläche unter der Visierebene, wenn beide Gesichtslinien der Medianebene parallel sind, und so ergibt sich die oben angegebene Konstruktion der geraden Horopterlinie.

Die Frage über den Grund des Einfach- und Doppeltsehens ist schon sehr alt Schon GALENUS[1] (geb. 113 p. C.) machte zur Erklärung des ersteren die Annahme, daß sich Sehnervenfasern im Chiasma der Sehnerven verbänden. Dieser anatomischen Hypothese schlossen sich später an I. NEWTON[2], ROHAULT[3], HARTLEY[4], W. H. WOLLA-

[1] De usu partium. Lib. X, cap. 12.
[2] *Opticks.* 1717. p. 320. Query 15.
[3] *Traité de physique.* Paris 1671 und 1682. Part. I, cap. 31.
[4] *Observations on man.* I, 207.

STON[1], JOH. MÜLLER[2]. Eine zweite Ansicht suchte die Schwierigkeit durch die Annahme zu beseitigen, daß wir immer nur mit einem Auge auf einmal sähen. Dieser Meinung war PORTA[3]. Ihm schlossen sich GASSENDI[4], TACQUET, GALL und DU TOUR[5] an. Letzterer berief sich dabei namentlich auf die Phänomene des Wettstreits zwischen beiden Gesichtsfeldern und beschränkte die Annahme auch dahin, daß bald gleichzeitig mit beiden Augen, bald nur mit einem gesehen werden sollte.

Die dritte davon verschiedene Ansicht war die sogenannte Projektionstheorie, wobei das Einfachsehen für einen Akt unseres Verständnisses der Gesichtsempfindungen erklärt wird. In ihrem Sinne äußert sich schon KEPPLER[6]; mit ihm gleichzeitig stellte AGUILONIUS[7] die Theorie auf, daß wir die Gesichtsbilder immer auf eine gewisse durch den Fixationspunkt gehende Ebene projizierten, die er den Horopter nannte, und daß sie einfach oder doppelt erschienen, je nachdem ihre Projektion einfach oder doppelt wäre. Näher an KEPPLERS Ansicht schließt sich PORTERFIELD an, indem er meint, wir sähen die Objekte nicht doppelt, weil jedes Auge sie an ihren richtigen Platz verlegt; was später dann so formuliert wurde, daß wir sie in den Kreuzungspunkt der Visierlinien verlegen. In dieser Form ausgesprochen, würde das Gesetz mit der Existenz der Doppelbilder im Widerspruch sein. PORTERFIELD erwähnt wohl solche, die bei einer durch Druck oder Zerrung herbeigeführten Zwangstellung des Auges eintreten, setzt hier aber voraus, daß ein Irrtum über die Stellung des Auges stattfinde.

Diese drei Ansichten liegen auch den neueren Theorien meist mehr oder weniger vermischt zugrunde; ein wesentlicher Fortschritt geschah aber durch genauere Untersuchungen der tatsächlichen Verhältnisse.

Das Gesetz der Erscheinungen wurde zuerst genauer und im wesentlichen richtig von J. MÜLLER[8] formuliert, indem er das Einfachsehen und Doppeltsehen davon abhängig machte, ob sich die Bilder des betreffenden Punktes auf identische oder nicht identische Punkte beider Netzhäute entwerfen. Für die Lage der identischen Punkte gab er die der Hauptsache nach richtige Regel, daß sie von der Mitte der Netzhäute in gleicher Richtung gleich weit entfernt lägen. Er spricht sich dabei nicht mit Bestimmtheit für eine besondere anatomische Hypothese (Vereinigung der identischen Fasern im Chiasma der Sehnerven oder im Gehirn) aus, behauptet aber, der Grund der Identität müsse ein organischer sein.

Genauere Bestimmungen der Lage der identischen oder korrespondierenden Punkte wurden später namentlich von VOLKMANN[9] gegeben. Mit der beobachteten Lage der identischen Punkte war aber die Annahme des AGUILONIUS, daß der Horopter eine Ebene sei, unverträglich. Schon VIETH[10] und JOH. MÜLLER hatten eingesehen, daß sein Schnitt mit der Visierebene ein durch den Fixationspunkt und die beiden Augen gehender Kreis sein müsse. Später zeigten A. P. PREVOST[11] und BURCKHARDT, daß in den Augenstellungen ohne Raddrehung zu dem MÜLLERschen Kreise noch eine gerade Linie komme, daß der Horopter also überhaupt im allgemeinen keine Fläche

[1] *Phil. Trans.* 1824. I, 222.

[2] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826.

[3] De refractione. p. 142. 1593.

[4] Opera. Vol. II, p. 395.

[5] *Acta Paris.* 1743. p. 334 *Mém. des savants étrang.* III, 514. IV, 499. V, 677.

[6] Dioptrice. Propos LXII.

[7] Opticorum Libri VI. Antwerp. 1613.

[8] Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826. p. 71. Lehrbuch der Physiologie. 1840. II, 376—87.

[9] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik von A. W. VOLKMANN. Zweites Heft. Leipzig 1864.

[10] Gilberts Annalen. LVIII, 233.

[11] *Essai sur la théorie de la vision binoculaire.* Genève 1843; und Pogg. Ann. 1844. Bd. LXII, S. 548.

sei. HERING[1] erwies, daß der Horopter im allgemeinen immer eine Linie sein müsse; damit war seine Bedeutung im Sinne des AGUILONIUS aufgehoben. Die allgemeine Lösung des Horopterproblems, welche noch die Kenntnis des Augenbewegungsgesetzes erfordert und übrigens eine rein mathematische Aufgabe war, habe ich selbst und Herr E. HERING fast gleichzeitig gegeben[2]. Daran schließt sich dann noch eine Arbeit von H. HANKEL[3], in welcher eine ausführlichere analytische Behandlung des Problems gegeben ist, aber ohne Berücksichtigung der hier sehr einflußreichen Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane.

Daneben ist dann seit WHEATSTONES Erfindung des Stereoskops die Aufmerksamkeit der Forscher hauptsächlich mit der Verschmelzung der Doppelbilder beschäftigt gewesen, weil sich an diese namentlich die theoretischen Fragen anknüpfen über die Art des Zusammenwirkens beider Augen. Diese theoretischen Fragen können wir erst am Schlusse des nächsten Paragraphen besprechen. Den großen Einfluß, welchen die Bewegung der Augen auf die Verschmelzung der disparaten Bilder körperlicher Objekte und stereoskopischer Zeichnungen habe, zeigte zunächst BRÜCKE[4]; daß dagegen eine solche Verschmelzung auch bei absoluter Vermeidung aller Augenbewegungen doch auch vorkommen kann (wenn auch in viel geringerem Grade), bewies DOVE[5] durch Anwendung der elektrischen Beleuchtung, Beobachtungen, welche

[1] Beiträge zur Physiologie. Heft III, S. 196—199. Leipzig 1863. Heft IV, 1864.

[2] Meine erste Mitteilung wurde gemacht der naturhistorisch medizinischen Gesellschaft zu Heidelberg am 24. Oktober 1862, das Manuskript eingereicht am 8. November 1862. Darin sind zum ersten Male Gleichungen für die Form des Horopters im allgemeinen Falle gegeben, freilich noch nicht in ihrer einfachsten Form, indem er als Schnittlinie einer Fläche zweiten und einer vierten Grades ausgedrückt ist. Auch ist darin noch nicht die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane berücksichtigt. Die Gestalt des Horopters im allgemeinen Falle ist darin kurz beschrieben. Ehe diese nur als vorläufige betrachtete Mitteilung durch den Druck veröffentlicht war (Herbst 1863), erschien das 3. Heft der Beiträge zur Physiologie von Herrn E. HERING, worin der Nachweis geführt war, daß der Horopter jedenfalls immer mindestens eine Linie (wenn nicht Fläche) sein müsse, die Gestalt desselben aber nur für die schon früher behandelten einfacheren Fälle wirklich bestimmt war. Dann folgte mein Aufsatz über den Horopter im Archiv für Ophthalmologie X, 1, S. 1—60, dessen Korrektur schon Mitte März 1864 vollendet war, worin der Horopter als Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades dargestellt und der Einfluß der Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane erörtert ist. Ohne Kenntnis dieser Arbeit zu haben, hat Herr E. HERING im Juni 1864 sein 4. Heft zum Druck gesendet, welches ebenfalls die Rückführung auf die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades enthält mit Benutzung der hierzu sehr geeigneten STEINERschen Geometrie. Die dabei gegen meine erste Arbeit gerichtete Kritik beruht wesentlich auf dem Mißverständnisse, daß ich von dem geredet habe, was ich oben Horopter, Herr HERING von dem, was ich Horopterkurve genannt habe, und daß beides nicht ganz identisch ist, wie ich in Poggendorffs Annalen CXXIII, S. 158—161 auseinandergesetzt habe. Endlich enthält das 5. Heft von HERINGs Beiträgen wieder eine Kritik meiner zweiten Arbeit, aus der ich nur einen Punkt (S. 350) erwähnen will, in welchem Herr HERING in der Tat recht hat: daß nämlich auf S. 44 meiner Abhandlung der Winkel η allgemein gleich η_1 gesetzt worden ist. Es ist das eine Flüchtigkeit, die mir bei der letzten, vor einer Reise sehr eilig gemachten Überarbeitung des Aufsatzes unterlaufen ist, in dem Streben die mathematische Ableitung möglichst zusammenzudrängen. Ich hatte vorher die beiden Fälle, in denen jene Behauptung richtig ist, einzeln behandelt und der Fehler hat also auch weiter keinen Einfluß auf die Richtigkeit der Konsequenzen. Die übrigen Ausstellungen, welche Herr HERING macht, haben teils nur persönliches Interesse, und werden von Lesern, die sich für dergleichen interessieren sollten, ohne weitere Erörterungen meinerseits leicht erledigt werden, teils können sie nur durch vielfach wiederholte Beobachtungen vieler Individuen entschieden werden. Was ich von solchen habe beibringen können, ist oben geschehen.

[3] Pogg. Annalen. CXXII, 575—588.

[4] MÜLLERS Archiv f. Anat. und Physiol. 1841. S. 459.

[5] Monatsber. d. Berl. Akad. 1841, 29. Juli.

später durch Volkmann[1], August[2], Recklinghausen[3] mit abgeänderten Methoden wiederholt und bestätigt wurden. Über die Grenze und die Bedingungen der Verschmelzung enthalten namentlich die Arbeiten von Panum[4] und Volkmann[5] eine große Menge sorgfältig gemachter Beobachtungen und Messungen. Der viel bestrittene Versuch von Wheatstone, wonach die Eindrücke identischer Punkte zur Ausfüllung verschiedener Stellen des Anschauungsbildes von den wahrgenommenen körperlichen Objekten gebraucht werden können, wurde einerseits bestätigt durch Nagel[6] und Wundt[7]. Andererseits wurde dagegen hervorgehoben, daß man bei hinreichender Aufmerksamkeit und Anwendung passender Mittel, um die Doppelbilder leichter sichtbar zu machen, auch immer die Bilder getrennt sehen könne, von Volkmann[8], E. Hering[9], W. Bezold[10]. Daß beides nicht notwendig im Widerspruch steht, habe ich oben erörtert.

113. Galenus, De usu partium. Lib. X, c. 12.
1593. Porta, De refractione. p. 142.
1611. Keppler, Dioptrice. Propos. LXII.
1613. Aguilonius, Opticorum libri VI. Antwerpen.
1658. Gassendi, Opera. Vol. II, p. 395.
1669. Tacquet, Opera mathematica.
1671. Rohault, *Traité de physique.* Paris 1671 und 1682. Part. I, cap. 31.
1704. I. Newton, Optice. Quaestro XXV.
1743. Du Tour, *Act.* Paris 1743 p. 334.
1759. Porterfield, *On the eye.* II, 285.
1760. Du Tour, *Pourquoi un objet sur lequel nous fixons les yeux, paroit-il unique? Mém. des savants étrang.* III, 514. IV, 499. V. 677.
1818. G. U. A. Vieth, Über die Richtung der Augen. Gilberts Ann. LVIII, 233.
1824. W. H. Wollaston, *On the semi-decussation of the optic nerves. Phil. Transact.* 1824. I, 222. *Edinb. Phil. Journ.* XXII, 420. *Annals of Philos.* 1824, April, p. 306.
1826. Joh. Müller, Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig.
1827. Tourtual, Die Sinne des Menschen. p. 234.
1838. Ch. Wheatstone, *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Transact.* 1838. P. II, p. 384—385.
1840. Joh. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen. Koblenz. Bd. II, S. 376—387.
1841. E. Brücke, Über die stereoskopischen Erscheinungen in J. Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1841. S. 459.
— Dove, Berl. Monatsb. 1841, 29. Juli.
1843. A. P. Prévost, *Essai sur la théorie de la vision binoculaire.* Genève. Auch in Pogg. Ann. 1844. LXII, 548.
1844. D. Brewster, *Law of visible position in single and binocular vision. Edinb. Phil. Trans.* XV.
1849. Locke, *On single and double vision. Phil. Mag.* XXXIV, 195. *Silliman Amer. J.* VII, 68.
— Lathrop, *Results additional to those offered by* Dr. Locke. *Silliman Journ.* VII. 343.

[1] Leipz. Berichte. 1859, S. 90—98.
[2] Pogg. Ann. CX, 582—593.
[3] Ebenda. CXIV, 170—173.
[4] Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858; und in Reichert und du Bois Reymonds Archiv. 1861. 63—227.
[5] Archiv f. Ophthalmologie. II, 2, 1—100; und Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik. Heft II.
[6] Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig und Heidelberg 1861.
[7] Henle und Pfeuffer Zeitschr. f. ration. Medizin. (3) XII, 249.
[8] Archiv für Ophthalmol. II, 2, S. 72—86.
[9] Beiträge zur Physiologie. Heft II, S. 81—131.
[10] Sitzungsber. d. Bayrischen Akad. der Wissensch. Math.-Phys. Klasse. 10. Dez. 1864.

1852. A. Müller, Über das Beschauen der Landschaften mit normaler und abgeänderter Augenstellung. Pogg. Ann. LXXXVI, 147—152. *Cosmos.* I, 336.

— D. Brewster, *Sur la vision binoculaire et le stéréoscope. North-British Review.* 1855, May. *Cosmos.* I, 422—425; 450—453.

1854. A. v. Graefe, Über Doppeltsehen nach Schieloperationen und Inkongruenz der Netzhäute. Archiv für Ophthalmol. I, 1, p. 82—120.

— F. Burckhardt, Über Binokularsehen. Verhandl. der naturf. Ges. in Basel. I, 123—154.

— Meissner, Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1854.

1855. H. Emsmann, Über Doppeltsehen. Pogg. Ann. XCVI, 588—602.

— W. B. Rogers. *Observations on binocular vision. Silliman J.* (2) XX, 86—98; 204—220; 318—335. XXI, 80—95; 173—189; 439. *Cosmos.* VIII, 229—230. *Arch. des sc. phys.* XXX, 247—249. *Edinb. J.* (2) III, 210—217.

1856. D. Brewster *on Mr.* Rogers *theory of binocular vision. Proc. of Edinb. Soc.* III, 356—358.

1857. Giraud Teulon, *Note sur le mécanisme de la production du relief dans la vision binoculaire. C. R.* XLV, 566—569; *Inst.* 1857. 345—346. *Cosmos* XI, 459—461; 490—492; 495—498.

— D. Brewster, *The stereoscope.* London.

1858. E. Claparède, *Quelques mots sur la vision binoculaire et sur la question de l'Horoptre. Arch. d. sc. phys.* (2) III, 138—168. III, 225—267; III, 362—368.

— P. L. Panum, Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel.

1859. A. P. Prévost, *Note sur la vision binoculaire. Arch. d. sc. phys.* (2) IV, 105—111.

— E. Claparède, *Remarques sur la note précédente.* Ebenda p. 112.

— J. v. Hasner, Über das Binokularsehen. Prager Ber. 1829, p. 10. Abhandl. der Kgl. Böhmischen Ges. (5) X, 25—34.

— A. W. Volkmann, Das Tachistoskop, ein Instrument, welches bei Untersuchung des momentanen Sehens den Gebrauch des elektrischen Funkens ersetzt. Leipz. Ber. 1859. p. 90—98.

— Derselbe, Die stereoskopischen Erscheinungen in ihrer Beziehung zu der Lehre von den identischen Netzhautstellen. Archiv für Ophthalm. V, 2, p. 1—100.

— A. Graefe, Beitrag zu der Lehre über den Einfluß der Erregung nicht identischer Netzhautpunkte auf die Stellung der Sehachsen. Archiv für Ophthalm. V, 1. 128—132.

— F. v. Recklinghausen, Netzhautfunktionen. Archiv f. Ophthalm. V, 2, p. 127—179; Pogg. Ann. CX, 65—92.

1860. F. August, Über eine neue Art stereoskopischer Erscheinungen. Pogg. Ann. CX, 582—593. *Phil. Mag.* (4) XX, 329—336. *Ann. de chim.* (3) LX, 506—509.

— W. Rogers, *Some experiments and inferences in regard to binocular vision. Edinb. J.* (2) XII, 285—287. *Silliman J.* (2) XXX, 387—390; 404—409. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. 2, p. 17—18.

— H. W. Dove, Über Stereoskopie (gegen v. Recklinghausens Zweifel betreffs der elektrischen Beleuchtung stereoskopischer Bilder). Pogg. Ann. CX, 494—498.

— Giraud Teulon, *De l'unité de jugement ou de sensation dans l'acte de la vision binoculaire. C. R.* LI, 17—20. *Cosmos.* XVII, 24—27. *Inst.* 1860. p. 217.

— T. Hayden, *Sulla funzione della macchia gialla del Sömmering nel produrre l'unità della percezione visuale nella visione binoculare.* Cimento XI, 255—257.

1861. A. Nagel, Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig und Heidelberg. 1861. p. 1—184. Verhandl. d. naturh. Vereins d. Rheinl. XVII. Sitzungsber. p. 9—12.

— F. v. Recklinghausen, Zum körperlichen Sehen. Pogg. Ann. CXIV, 170—173. (Die Wirkung instantaner Beleuchtung betreffend.)

— W. Wundt, Über das Sehen mit zwei Augen. Henle u. Pfeuffer. (3) XII, 145—262.

— P. L. Panum, Über die einheitliche Verschmelzung verschiedenartiger Netzhauteindrücke beim Sehen mit zwei Augen. Reichert Arch. für Anat. u. Physiol. 1861. p. 63—111; 178—227.

— F. Burckhardt, Die Empfindlichkeit des Augenpaares für Doppelbilder. Pogg. Ann. CXII, 596—606. Verhandl. der naturh. Ges. in Basel. III, 33—44.

1861. O. N. Rood, *On the relation betwen our perception of distance and colour. Silliman J.* XXXII, 184—185.
1862. Bahr, Über die Nichtexistenz identischer Netzhautstellen. Arch. für Ophthalm. VIII, 2, p. 179—184.
— A. Nagel, Über die ungleiche Entfernung von Doppelbildern, welche in verschiedener Höhe gesehen werden. Archiv für Ophthalm. VIII, 2, 368—387.
— E. Hering, Beiträge zur Physiologie. 2. bis 5. Heft. Leipzig 1862—1864.
1863. L. Hermann, Notiz über die Gestalt der Horopterfläche bei konvergenten Sekundärstellungen. Zentralbl. für medizinische Wissenschaften. 1863. Nr. 51.
— J. Towne, *The stereoscope and stereoscopic results.* Gays *hospital rep.* 1862—1865.
— F. C. Donders, Die Refraktionsanomalien des Auges und ihre Folgen. Archiv für die holländischen Beiträge. III, p. 358. Pogg. Ann. CXX, p. 452.
— A. W. Volkmann, Über identische Netzhautstellen. Berliner Monatsber. 1863. August. (Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane)
— H. Helmholtz, Über die normalen Bewegungen des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalm. IX, 2, p. 188—190. (Dieselbe Abweichung beschrieben.)
1863. E. Hering über W. Wundts Theorie des binokularen Sehens. Pogg. Ann. CXIX, 115; CXXII, 476.
— W. Wundt über Dr. E. Herings Kritik meiner Theorie des Binokularsehens. Ebenda CXX, 172.
— A. W. Volkmann, Vorläufige Mitteilung über den Horopter und die Achsendrehung des Auges. Zentralblatt für die medizinischen Wissenschaften. 1863. Nr. 51.
1864. E. Hering, Das Gesetz der identischen Sehrichtungen. Reichert und du Bois Reymonds Archiv. 1864. S. 27.
— Derselbe, Bemerkungen zu Volkmanns neuen Untersuchungen über das Binokularsehen. Ebenda S. 303.
— W. v. Bezold, Zur Lehre vom binokularen Sehen. Sitzungsber. der Königl. Bayrischen Akad. Math. Phys. Kl. 10. Dez. 1864.
— H. Helmholtz, Über den Horopter. Archiv für Ophthalm. X, 1—60.
— Derselbe, Bemerkungen über die Form des Horopters. Pogg. Ann. CXXIII, 158—161.
1865. D. Brewster *on Hemiopia* in *Phil. Mag.* (4) XXIX, 506—507.
1868. H. Aubert, Physiologie der Netzhaut. 280—331.
— E. Hering in Reichert und du Bois Reymonds Archiv. 1865.
— A. Graefe, Über einige Verhältnisse des Binokularsehens, bei Schielenden mit Beziehung auf die Lehre von der Identität der Netzhäute. Archiv für Ophthalm. XI, 2, 1—46.

Zusätze von v. Kries.

1. Abweichend von den hier mitgeteilten Versuchsergebnissen Volkmanns ist später von Hering die Vermutung ausgesprochen worden, daß zwei Punkte des rechten und linken Netzhauthorizontes, um den Eindruck gleicher Abstände vom Fixationspunkt zu erzeugen, nicht genau gleiche Winkelabstände vom Zentrum haben müssen, vielmehr der Winkelabstand immer für dasjenige Auge etwas größer sein muß, in dem er nach der nasalen Seite (der lateralen des Gesichtsfelds entsprechend liegt. Diese (oben bereits kurz erwähnte Annahme gründet sich, wie dort auch schon angeführt wurde, in erster Linie auf die sogenannte Kundtsche Täuschung. Wenn man sich die Aufgabe stellt bei einäugiger Beobachtung eine horizontale von rechts nach links verlaufende Linie zu halbieren, so setzt man durchschnittlich den Halbierungspunkt etwas zu weit nach der für das betreffende Auge medialen Seite. Dies besagt ja, daß ein horizontaler Winkelabstand, um gleich zu erscheinen, auf der nasalen Gesichtshälfte etwas kleiner als in der temporalen sein muß. Geht man von der berechtigten Annahme aus, daß die Verhältnisse in beiden Augen symmetrisch

sind, so folgt daraus die erwähnte Beziehung für die Lage korrespondierender Punkte.

Sodann ist hier auf gewisse schon früher besprochene Beobachtungen zurückzukommen, diejenigen nämlich über die Anordnung, die Gegenstände haben müssen, um in einer senkrecht gegen die Blicklinie gelegenen Ebene der Kernfläche HERINGS) zu erscheinen. Nach der dort schon besprochenen Annahme HERINGS sollte dies dann der Fall sein, wenn die Gegenstände im Längshoropter liegen. Und man hat, wie dort auch schon erwähnt wurde, daraufhin angefangen, die so gefundene Anordnung kurzerhand als „empirischen Längshoropter" zu bezeichnen. In der Tat bestätigten die Versuche HILLEBRANDS, daß diese vom MÜLLERschen Kreise abweichen und zwar in dem Sinne, wie der Horopter von ihm abweichen müßte, wenn die temporalen Erstreckungen des Gesichtsfeldes etwas kleiner als die nasalen gesehen würden, also bei der nämlichen Abweichung, die sich auch aus den KUNDTschen Versuchen mit Wahrscheinlichkeit erschließen läßt. Demgemäß ist dann vielfach diese Abweichung des Horopters von der ursprünglich angenommenen einfachen Form als die HERING-HILLEBRANDsche Horopterabweichung bezeichnet worden. Eine direkte Prüfung dieser Verhältnisse durch Korrespondenzversuche nach Art der VOLKMANNschen ist bis jetzt nicht ausgeführt worden, dürfte wohl auch auf große Schwierigkeiten stoßen.

Wir müssen ferner betonen, daß die Versuche über Tiefenlokalisation einen Beweis für eine bestimmte Horoptergestaltung immer nur insofern enthalten, als man die Gültigkeit der mehrerwähnten HERINGschen Regel voraussetzt. Allerdings würde man ja wohl mit Recht, wenn die Gesamtheit der hierhergehörigen Erscheinungen sich unter Zugrundelegung der beiden in Frage kommenden Annahmen (der Horopterabweichung und der HERINGschen Regel bzw. der Lokalisation in der Kernfläche) glatt und insbesondere auch in quantitativer Übereinstimmung befänden, darin einen gewissen Beweis für Richtigkeit beider Annahmen erblicken dürfen. Für gewisse Bedingungen haben die Beobachtungen FRANKS[1], von denen oben die Rede war, eine solche Übereinstimmung ergeben. Es wurde aber dort auch schon darauf hingewiesen, daß die Beobachtungen in betreff der Tiefenlokalisation nicht so erschöpfend sind, um ein abschließendes Urteil zu gestatten. Man kann daher m. E. zurzeit nur sagen, daß die Horopterabweichung aus der KUNDTschen Täuschung mit großer Wahrscheinlichkeit erschlossen werden darf; ob dagegen die HERINGsche Regel durchgängig zutrifft und ob demgemäß auch in den Beobachtungen über Tiefenlokalisation ein Beweis für die Horopterabweichung erblickt werden darf, darüber sind zurzeit mindestens noch erhebliche Zweifel berechtigt. Zu der Annahme, daß die Form des Horopters in gewissem Maße von der Natur der Seheindrücke abhänge, sind TSCHERMAK u. KIRIBUCHI[2] in ihren bereits an früherer Stelle erwähnten Versuchen gelangt. Diese waren, wie dort angeführt, darauf gerichtet, diejenigen Orte senkrechter Linien zu finden, bei denen sie in einer zur Blickrichtung normalen Ebene zu liegen scheinen. Hierin erblicken die Vff. eine Horopterbestimmung auf Grund der HERINGschen Annahme, derzufolge dies für die Punkte des Längshoropters gelten sollte. Da sie nun finden, daß die erforderliche Anordnung einerseits bei dauernd sichtbaren Fäden, andererseits

---

[1] FRANK, PFLÜGERS Archiv 109. S. 63. 1905.

[2] PFLÜGERS Archiv 81. S. 328. 1900.

seits bei fallenden Kugeln eine verschiedene sein mußte, so gelangen sie dazu, einen Lot- und einen Fallhoropter zu unterscheiden. Mir scheint jedoch, daß eine derartige Abhängigkeit des Horopters d. h. also der Korrespondenzbeziehung von der besonderen Beschaffenheit der gesehenen Gegenstände schwer denkbar und am wenigsten mit der Annahme eines jedem Netzhautpunkt zukommenden festen Breitenwertes vereinbar ist. Es scheint mir daher, wie oben schon erwähnt, richtiger, in den Versuchen lediglich den Ausdruck der Tatsache zu erblicken, daß die Tiefenlokalisation den Querdisparationen nicht in ganz fester Weise zugeordnet, sondern von der besonderen Art der optischen Reize bezw. der gesehenen Gegenstände mit abhängig ist. Demgemäß werden wir denn Ermittelungen von der hier vorliegenden Art überhaupt nicht in strengem Sinne als Horopterbestimmungen gelten lassen.

2. Die gleichen Erscheinungen sind mehrfach unter dem andern Gesichtspunkt erörtert und untersucht worden, daß die binokulare Tiefenwahrnehmung nicht an die Verschmelzung zu einem einheitlichen Eindruck geknüpft, sondern auch bei deutlichem Doppeltsehen möglich ist. Die hierhergehörigen Untersuchungen sind demgemäß schon an früherer Stelle (Anm. 11 zu § 30) besprochen worden.

3. Die Wahrnehmung der Doppelbilder wird für viele Personen durch besondere offenbar mit Wettstreitsverhältnissen zusammenhängende Umstände erschwert. Für die beste Methode, sie auch den mit solchen Eigentümlichkeiten behafteten und wenig geübten Personen sichtbar zu machen, möchte ich auf Grund langer Erfahrungen erklären, daß nicht einzelne Objekte in verschiedenen Abständen, sondern ein einheitlicher vom Beobachter in die Entfernung sich erstreckender Gegenstand betrachtet wird. Man läßt z. B. an einer Wand, etwa in Augenhöhe, das eine Ende einer starken, etwa zwei Meter langen Schnur befestigen; der Beobachter stellt sich etwa 1,5 m von der Wand auf und spannt die Schnur gegen seine Nasenwurzel. Wenn er dann einen Zeigefinger an irgend eine Stelle der Schnur bringt und fixiert, so nimmt er zwei Schnüre wahr, die an der betreffenden Stelle sich zu kreuzen scheinen. Die Wahrnehmung wird durch Hin- und Herbewegung des Fingers längs der Schnur noch erleichtert und gelingt, so weit ich gesehen habe, bei normalen Augen ausnahmslos, auch Personen, denen das Doppeltsehen einzelner Gegenstände (Finger, Kerzenflamme) trotz vieler Bemühung nicht möglich ist.

4. Die Frage nach der Unterscheidbarkeit rechts- und linksäugiger Eindrücke kann in mancherlei verschiedenen Bedeutungen genommen werden, deren Auseinanderhaltung einige Aufmerksamkeit erfordert, übrigens bei dem theoretischen Interesse der Sache nicht ohne Wichtigkeit ist. Halten wir uns zunächst an diejenige Einteilung, die sich unmittelbar an das tatsächlich zu beobachtende anknüpft, so können wir an die Spitze die schon im Texte behandelte Frage stellen, ob es mit Bezug auf die Tiefeneindrücke einen Unterschied macht, ob zwei (untereinander nicht korrespondierende) Stellen des rechten und linken Auges a und b, oder die ihnen beziehungsweise korrespondierenden a' und b' gereizt werden. Diese Frage ist keine andere, als die nach der Möglichkeit einer Umkehrung der binokularen Tiefenwerte (Reliefumkehrung). Tatsächlich erhalten wir ja in dem einen Falle einen positiven, in dem andern einen negativen Tiefeneindruck. Schon die im Texte angeführten Beobachtungen lehren, daß eine solche auch wo Augenbewegungen ausgeschlossen sind nicht eintritt. Das gleiche ist in späteren Versuchen vielfach bestätigt worden.

In unseren Versuchen über Unterscheidungszeiten ließen AUERBACH und ich[1] elektrische Funken vor oder hinter dem Fixationspunkt überspringen und zwar in solchen Abständen, daß in beiden Fällen gleichweit voneinander abstehende Doppelbilder gesehen wurden, die demgemäß in dem einen Falle gekreuzte, in dem anderen gleichnamige waren. Für die Erkennung der Tiefenlage war nach unseren Beobachtungen eine Zeit von 22—30 erforderlich. Verwechselungen kamen nicht vor. In späterer Zeit ist die Fähigkeit richtiger Tiefenwahrnehmung bei sehr kurzen, die Einmischung von Augenbewegungen ausschließenden Beobachtungen sehr häufig geprüft worden, vorzugsweise weil sich an das Vorhandensein bzw. Fehlen dieser Fähigkeit bei Schielenden ein besonderes Interesse knüpft. Man bedient sich dazu jetzt in der Regel eines einfachen für die meisten Zwecke genügenden Apparates, den HERING angegeben hat. Der zu prüfende Beobachter schaut in ein Papprohr, das eine Fixationsmarke enthält, außerdem oben und unten mit mehreren Öffnungen versehen ist. Durch diese läßt man kleine Kügelchen herunterfallen, die demgemäß sehr schnell durch das Gesichtsfeld hindurch gleiten. Eine passende Anordnung der Öffnungen gestattet die Kügelchen vor oder hinter dem Fixationspunkt fallen zu lassen. Normalsehende Beobachter wissen bei binokularer Beobachtung stets mit Sicherheit anzugeben, ob das Kügelchen vor oder hinter dem Fixierpunkt gefallen ist. Hieraus geht hervor, daß rechts- und linksäugige Eindrücke bez. der Bedeutung, die sie für die Entstehung von Tiefeneindrücken haben, sich unterscheiden. Eine andere Frage ist es, ob sie in dem Sinne unterscheidbar sind, wie wir etwa die Tastreize der rechten und linken Hand unterscheidbar nennen. Dies würde in vollem Maße dann der Fall sein, wenn bei jedem nur ein Auge treffenden Lichtreiz der Beobachter anzugeben imstande wäre, ob die Empfindung dem linken oder dem rechten Auge angehört. Bezüglich dieser Frage macht HELMHOLTZ zwar eine gewisse Andeutung, die aber mehr auf gelegentlicher Beobachtung, als auf direkter Untersuchung zu beruhen scheint. Genauer geprüft wurden die Verhältnisse in neuerer Zeit von HEINE[2], der zeigte, daß in gewissen Fällen in der Tat eine Unterscheidung rechts- und linksäugiger Eindrücke möglich ist. Läßt man im ganz verdunkelten Raume ein nur dem einen Auge sichtbares Lichtpünktchen aufblitzen, so vermag der Beobachter meist anzugeben, welches Auge das sehende war; und zwar gilt das auch dann, wenn eine Anzahl von Fehlerquellen wie z. B. eine Differenz der Richtungen, in denen das eine und andere Auge das Signal erblickt, durch besondere Vorsichtsmaßregeln ausgeschlossen waren. Die Wiederholung dieser Versuche durch BRÜCKNER und v. BRÜCKE[3] hat dies zwar nicht für alle, aber doch für manche Beobachter bestätigt, zugleich jedoch gewisse Bedingungen kennen gelehrt, an die eine solche Unterscheidung geknüpft ist. Läßt man einen Beobachter durch zwei innen schwarze Pappröhren gegen eine weiße Tafel blicken, so daß die hinteren Öffnungen der Röhren stereoskopisch verschmelzen und bewegt alsdann ein kleines Objekt hinter der einen vorbei, so ist nach BRÜCKNER und v. BRÜCKE der Beobachter niemals imstande anzugeben, ob dasselbe mit dem rechten oder linken Auge gesehen wurde. Die Möglichkeit einer Unterscheidung dagegen

[1] Archiv für Physiologie 1878.
[2] HEINE. Klinische Monatsblätter 39. Derselbe, PFLÜGERS Archiv 101.
[3] BRÜCKNER u. v. BRÜCKE, PFLÜGERS Archiv. 90. S. 290. 1902. Ebenda 91. S. 360. 1902. Ebenda 07. S. 263. 1905.

ist diesen Autoren zufolge insbesondere dann möglich, wenn ein Auge gar nichts sieht, so wenn im ganz verdunkelten Gesichtsfeld ein Lichtpunkt nur für ein Auge sichtbar wird, oder wenn die Seheindrücke eines Auges im ganzen denen des anderen gegenüber minderwertig sind, wie z. B. durch Mangel an Dunkeladaptation, Verwischung der Bilder durch Konvexlinsen und dergl. Als ein besonders frappantes Beispiel führen die Verf. die eigentümliche Empfindung an, die man hat, wenn man ein Auge durch einen Verband dunkeladaptiert hat und dann in einem sehr schwach erleuchteten Raum den Verband entfernt. Man hat dann in eigenartiger Weise das Gefühl, vor dem nicht adaptierten Auge irgend ein Sehhindernis zu haben. Ihnen zufolge sind also nicht sowohl die Seheindrücke als rechts- oder linksäugige unterscheidbar, als vielmehr jenes Gefühl des Nicht- oder Mangelhaft-Sehens, das sie als ein Organgefühl bezeichnen. — Erwägen wir was die Tatsachen lehren, so dürfen wir uns, wie ich glaube, durch die Benennung Organgefühl doch nicht darüber täuschen lassen, daß es eine mit den optischen Empfindungen verknüpfte und auf sie bezügliche Unterscheidung ist, die sich hier herausstellt. Auch das Nicht- oder Schlechtsehen ist doch ein psychischer Zustand, den wir als eine besondere Gestaltung der optischen Empfindungen ansprechen und den wir auf ein Verhalten der „Sehsubstanz“ im Heringschen Sinne, anatomisch gesprochen also der Optikusfasern und der sich ihnen zentralwärts anschließenden Gebilde beziehen dürfen, während wir nicht etwa an Vorgänge im Gebiete der Tastnerven, wie etwa von der Bindehaut oder der Cornea ausgehende denken können. Auf der anderen Seite zeigt es sich, daß es nicht zutreffend wäre, dem einzelnen Seheindruck eine psychische Besonderheit zuzuschreiben, die ihn unmittelbar als rechts- oder linksäugigen kenntlich machte.

Werfen wir hiernach die Frage auf, ob und in welchen Hinsichten denn nun ein Unterschied des Erfolges stattfindet, wenn ein Lichtreiz eine Stelle des rechten oder die korrespondierende des linken Auges trifft, so werden wir sagen müssen, daß ein solcher Unterschied jedenfalls besteht. In verschiedenen Hinsichten ist es nicht gleichgültig, ob das eine oder das andere der Fall ist. Aber wir können den Unterschied nicht in einer bestimmten, den einen und anderen Eindrücken zukommenden psychischen Qualität aufweisen; psychische Unterschiede sind in vielen Fällen nicht vorhanden, wenigstens nicht erweisbar. Wir werden daher m. E. als regelmäßigen Erfolgsunterschied einen physiologisch (oder anatomisch) charakterisierten annehmen müssen, der je nach besonderen Umständen sich psychisch (mit Bezug auf die Tiefenwerte, durch ein Gefühl des Nichtsehens usw.) geltend machen, unter Umständen aber auch ohne psychisches Korrelat bleiben kann.[1]

§ 32. Wettstreit der Sehfelder.

In den beiden vorausgehenden Paragraphen haben wir gesehen, daß wir beim unbefangenen zweiäugigen Sehen Bilder körperlicher Objekte in den Raum vor uns projizieren, daß wir aber auch andererseits, wenn wir auf das gemeinschaftliche Gesichtsfeld unserer Augen als solches achten, die beiden verschiedenen perspektivischen Projektionen, welche von den Objekten auf unsern Netzhäuten

[1] Die weiteren an dieses Ergebnis zu knüpfenden Erwägungen bleiben der Besprechung des Gegenstandes im Schlußkapitel vorbehalten.

entworfen werden, als einander superponiert in der Fläche des gemeinsamen Gesichtsfeldes erblicken können. Die erste Art des Sehens tritt vorzugsweise ein beim Sehen körperlicher Objekte, wenn unsere Aufmerksamkeit den Gegenständen zugewendet ist. Wir wenden dann immer die Gesichtslinien beider Augen demjenigen Objekte zu, auf welches sich unsere Aufmerksamkeit zur Zeit richtet, und wir sehen dieses also immer einfach und deutlich, und die ferner oder näher liegenden Gegenstände, welche zurzeit im mehr oder weniger indirekten Sehen doppelt erscheinen könnten, bleiben unbeachtet. Um Doppelbilder zu sehen, müssen wir auf unsere Gesichtseindrücke als solche achten und zu abstrahieren suchen von den wahrgenommenen Objekten. Am ungestörtesten werden die Doppelbilder und die entsprechenden Erscheinungen der Kongruenz oder Inkongruenz der einzelnen Punkte beider Sehfelder beobachtet, wenn man nicht nach wirklichen Objekten hinsieht, sondern nach zwei verschiedenen Zeichnungen mit verschiedenartig gefärbten oder erleuchteten Linien und Feldern, wie dergleichen von uns gebraucht wurden, um die korrespondierenden Stellen der Gesichtsfelder zu finden.

In den bisherigen Fällen waren die Doppelbilder, welche gesehen wurden, mehr oder weniger ähnlich den Bildern, welche man gelegentlich von einem und demselben äußeren Objekte erhalten kann, und uns deshalb geläufig und bekannt als Zeichen eines nicht im Horopter liegenden Objektes, so daß wir mittels derselben sogar die Entfernung des ihnen entsprechenden Objekts noch annähernd richtig beurteilen konnten.

Wir haben nun noch die Fälle zu untersuchen, wo beide Gesichtsfelder gefüllt sind mit ganz verschiedenartigen Formen, welche keine Kombination zu dem Bilde eines Körpers zulassen. In solchen Fällen sieht man im allgemeinen beide Bilder gleichzeitig und im Gesichtsfelde einander superponiert. Aber gewöhnlich herrscht in einzelnen Teilen des Gesichtsfeldes mehr das eine Bild vor, in anderen mehr das andere; und unter Umständen wechselt das auch, so daß, wo eine Zeitlang nur Teile des einen Bildes sichtbar waren, nun die Teile des anderen hervortreten und jene ersteren verdrängen. Dieser Wechsel, in welchem die Teile beider Bilder bald nebeneinander, bald nacheinander sich gegenseitig verdrängen, pflegt man den W e t t s t r e i t d e r S e h f e l d e r zu nennen.

Am einfachsten und regelmäßigsten sind diejenigen Fälle, wo das eine Sehfeld in ganzer Ausdehnung gleichmäßig gefärbt oder erleuchtet ist; man bemerkt dann nur die Objekte, welche das andere Sehfeld enthält. Wenn man also z. B. ein Auge schließt und mit dem anderen das bedruckte Blatt ansieht, so sieht man die Buchstaben und das weiße Papier im Sehfelde, ohne das Dunkel des anderen Sehfeldes zu bemerken. Dabei ist zu beachten, daß das Papier dabei nicht gerade entschieden dunkler aussieht, als wenn man es mit beiden Augen betrachtet. Das Schwarz des einen Feldes mischt sich also nicht mit dem Weiß des anderen, sondern hat eben weiter gar keinen Einfluß auf die Erscheinung des anderen Bildes.

Ebenso ist es nun, wenn man das bisher verschlossene Auge öffnet und ein Blatt weißen Papiers nahe davorhält, so daß das bisher dunkle Sehfeld gleichmäßig weiß beleuchtet wird. Auch dann sieht man die Buchstaben im anderen Felde unverändert, und wenn das gleichmäßig weiße Papier nicht heller ist als das bedruckte, so erscheint letzteres auch nicht heller, wenn das andere Sehfeld gleichmäßig weiß, als wenn es gleichmäßig schwarz ist. Wenn

man sich aber so wendet, daß das weiße vor das eine Auge gehaltene Papier lebhaft von der Sonne beschienen wird, so erhält man allerdings beim Öffnen des betreffenden Auges den Eindruck, daß das bedruckte Papier heller wird, wenn das andere Sehfeld erleuchtet wird, als wenn es dunkel bleibt.

Ähnlich verhält es sich nun auch, wenn nur größere Teile des einen Sehfeldes gleichmäßig beleuchtet, in dem entsprechenden Teile des anderen aber Figuren enthalten sind. Betrachtet man z. B. die folgenden Buchstaben

A B   B C

so, daß die beiden *B* aufeinanderfallen und einfach gesehen werden, so erscheinen sie wie

A B C

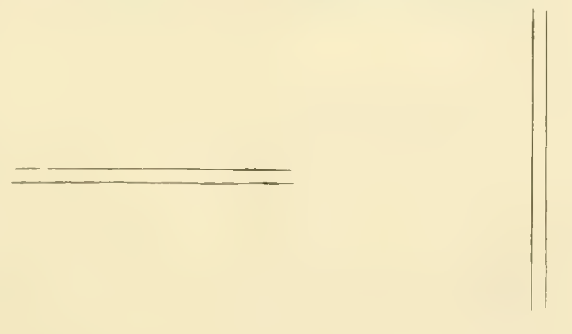
und zwar so, daß das *A* und *C* nicht merklich dunkler sind, als das doppeläugig gesehene *B*. In diesem Falle also ist links vom *B* nur das linke Gesichtsfeld beachtet worden, welches das *A* enthält, und rechts vom *B* tritt das *C* des rechten Sehfeldes hervor, während der gleichmäßig weiße Grund des anderen Feldes sich nicht merklich geltend macht.

Wenn nun in beiden Sehfeldern breitere schwarz und weiße Figuren vorkommen, deren Grenzlinien in dem gemeinsamen Sehfelde sich gegenseitig durchschneiden, so ergibt sich im allgemeinen die Regel, daß längs und in der Nähe jeder Grenzlinie dasjenige Sehfeld prädominiert, dem diese Grenzlinie angehört. Bringt man also z. B. die beiden schwarzen Streifen der Fig. *V*, Taf. VI, zum Decken, so daß die weißen Punkte in ihrer Mitte zusammenfallen, so entsteht ein Gesamtbild, wie es Fig. 73 etwa darstellt. Die beiden Streifen erscheinen als Kreuz, dessen Mitte ganz schwarz ist, weil hier Schwarz und Schwarz sich decken. Der Grund erscheint weiß, weil auf ihm Weiß und Weiß sich decken. In den vier Schenkeln des Kreuzes deckt sich jedesmal Weiß des einen Feldes mit Schwarz des anderen; sie erscheinen aber keineswegs gleichmäßig erhellt durch eine Mischung dieses Schwarz und Weiß. Vielmehr sind sie fast ganz schwarz an ihren Enden, wo sie an den weißen Grund stoßen, und fast ganz weiß, wo sie an das mittlere schwarze Quadrat stoßen, und dazwischen sind Übergänge des Schwarz in Weiß, die aber keineswegs eine ruhige Beleuchtungsart behalten und sich deshalb auch durch keinerlei bildliche Darstellung vollkommen wiedergeben lassen, sondern mannigfach wechseln. Das Ende jedes Streifens fällt zusammen mit einem Teil des gleichmäßig weißen Grundes des andern Gesichtsfeldes, und verdrängt diesen, so daß es fast ganz schwarz erscheint. Nahe der Mitte jedes Streifens aber laufen über ihn die Grenzlinien des anderen aus dem anderen Sehfelde hin, und hier tritt also das Weiß des anderen Feldes längs der Grenzlinie auf dem Schwarz des erstgenannten Streifens deutlich hervor.



Fig. 73.

In den bisher betrachteten Fällen standen sich immer gegenüber eine Figur mit bestimmten Konturen und ein ganz leeres gleichmäßiges Feld. Dabei zeigte sich, daß die Konturen sich immer sichtbar machen und den Eindruck des leeren Feldes verdrängen. Setzen wir nun statt des ganz leeren Feldes ein solches, welches ein feines gleichmäßig wiederholtes Linienmuster enthält, richten wir z B. das linke Auge auf das schwarze Kreuz der Fig. *W*, Taf. VI, und gleichzeitig das rechte auf das karrierte Feld, so überwiegt im ersten Augenblick auch hier in der Regel das Kreuz so, als ob wir es auf einen reinen Grund projizierten, und nur in seiner Mitte und jenseits seines Umfanges wird vielleicht das Linienmuster sichtbar. Betrachten wir es ohne bestimmte Richtung unserer Aufmerksamkeit längere Zeit in dieser Weise, so tritt zeitweilig das Linienmuster auch wohl über das ganze Feld hervor und verdeckt das ganze Kreuz oder wenigstens einzelne Teile desselben. Dagegen muß ich hervorheben, daß ich mich jeden Augenblick imstande finde, meine Aufmerksamkeit jedem Teile des Linienmusters, auch denen, die gerade auf den Rand des Kreuzes fallen, willkürlich und ausschließlich zuzuwenden, und daß ich dann nur das Linienmuster sehe, während das Kreuz meist ganz schwindet. Ich brauche nur eine Reihe von Quadraten des Linienmusters zu zählen, oder die Quadrate zu vergleichen, ob sie gleich groß, ob sie rechtwinkelig sind und so weiter. Während und so lange ich in dieser Weise meine Aufmerksamkeit fest auf die Quadrate fixiere, bleiben sie mir auch im Gesicht. So wie ich im Gegenteil eine Ecke oder Seite des Kreuzes in ähnlicher Weise beobachte, verschwindet das Linienmuster mehr oder weniger vollständig, und ich sehe anhaltend das Kreuz.


Fig. 74.

Der Wettstreit wird noch auffallender, wenn die beiden sich deckenden Figuren gleich stark hervortretende Konture haben. Bringt man z. B. die beiden Linienpaare der Fig. 74 zum Decken, so pflegen die meisten Beobachter im Anfang nur die senkrechten Linien an der Kreuzungsstelle zu sehen, während die horizontalen im Zwischenraum der Vertikallinien oder auch selbst noch außerhalb dieses Zwischenraums verschwinden. Bei längerem Fixieren tauchen sie von Zeit zu Zeit auf, während dafür die vertikalen verschwinden und umgekehrt. Aber auch hier kann ich beliebig das Bild des einen oder anderen Paares festhalten, wenn ich meine Aufmerksamkeit darauf richte und etwa untersuche, ob irgend welche Unregelmäßigkeiten an den Linien des einen oder anderen Paares vorkommen.

In komplizierterer Weise zeigt sich derselbe Wettstreit an den mit verschieden gerichteten parallelen Linien bedeckten Feldern der Fig. *X*, Taf. VI. Man sieht hier keine gleichmäßige Kreuzung der Linien in dem Gesamtbilde, wodurch ein ähnliches Linienmuster, wie das der Fig. *W* derselben Tafel, sich zusammensetzen würde; sondern man sieht meist eine ungleichmäßige Mischung beider Muster, so daß an einzelnen Stellen des Feldes das eine, an anderen das andere vorherrscht, wobei diese Stellen selbst übrigens einem fortdauernden

Wechsel unterworfen sind. Die schwarzen Quadrate in der Mitte der Felder sollen als Fixationszeichen dienen, wenn der Beobachter eine unveränderte Lage beider Felder übereinander zu erhalten wünscht. Ohne einzelne korrespondierende und stark hervorstechende Teile der Figur ist dies sonst gar nicht möglich, vielmehr schwanken die Blicklinien dann fortdauernd zwischen verschiedenen Graden der Konvergenz hin und her.

Zuweilen tritt auch wohl in ganzer Ausdehnung der Fläche das eine System allein für kurze Zeit auf. Auch hier finde ich, daß ich vollkommen willkürlich imstande bin, meine Aufmerksamkeit bald dem einen, bald dem anderen Liniensysteme zuzuwenden, und daß dann dieses System für einige Zeit allein gesehen wird und das andere vollkommen verschwindet. Dies geschieht z. B., wenn ich versuche die Linien erst des einen und dann des anderen Systems zu zählen. Ich finde ferner, daß dieses Beachten des einen Liniensystems auch nicht von bestimmten Augenbewegungen abhängig ist; denn ich kann meinen Blick sowohl an den Linien, auf die ich achte und die ich sehe, entlang gleiten lassen, als auch rechtwinkelig gegen ihre Richtung und also parallel der Richtung des anderen Systems fortführen, so daß ich von einer Linie zur anderen gehe, ohne daß ich aufhöre, nur das System zu sehen welches ich sehen will. Aber allerdings finde ich, wie Wundt, daß es leichter ist, das Bild derjenigen Linien festzuhalten, deren Richtung man mit dem Blicke folgt; in der Tat ist dies auch die gewöhnliche Art unsere Aufmerksamkeit einer Linie zuzuwenden, daß wir den Blick an ihr entlang laufen lassen, und indem wir die Bewegung unserer Augen absichtlich nach der Linie richten, sind wir auch sicher, unsere Aufmerksamkeit an die Linie zu fesseln.

Es ist aber allerdings schwer, die Aufmerksamkeit längere Zeit an eines der Liniensysteme von Fig. X, Taf. VI zu fesseln, wenn man nicht damit irgend einen bestimmten Zweck verbindet, der eine fortdauernde aktive Tätigkeit der Aufmerksamkeit bedingt, wie eben das Zählen der Linien oder die Vergleichung ihrer Zwischenräume und so weiter ist. Ein anhaltender Ruhezustand der Aufmerksamkeit ist ja auch unter anderen Verhältnissen kaum für einige Zeit zu unterhalten. Der natürliche ungezwängte Zustand unserer Aufmerksamkeit ist herumzuschweifen zu immer neuen Dingen, und so wie das Interesse eines Objektes erschöpft ist, so wie wir nichts Neues mehr daran wahrzunehmen wissen, so geht sie wider unseren Willen auf anderes über. Wollen wir sie an ein Objekt fesseln, so müssen wir eben an diesem selbst immer Neues zu finden suchen, besonders wenn andere kräftige Sinneseindrücke sie abzulenken streben. Durch diese Eigentümlichkeit unserer psychischen Tätigkeit erklären sich, wie mir scheint, die oben beschriebenen Tatsachen.

Die letztgenannten Versuche kann man vielfach variieren; wenn man z. B. das quadratische Muster der Fig. IV, Taf. VI, mit einem danebengelegten Blatt bedruckten Papiers zur Deckung bringt, kann man ohne Schwierigkeit die Buchstaben lesen oder andererseits das Linienmuster betrachten. Dasselbe ist der Fall, wenn man eine fein ausgeführte Landkarte oder eine Photographie mit einem bedruckten Blatt zum Decken bringt; es müssen nur nicht die Zeichnungen der einen Seite durch Helligkeit allzu hervorstechend sein gegen die der anderen Seite, und auch einander nicht zu ähnlich. Wenn man z. B. zwei verschiedene Druckblätter mit gleicher Art von Druck kombiniert, so verbindet der Beobachter unwillkürlich Teile der einen Partie von Buchstaben

mit solchen der anderen Seite doppeläugig, und dadurch mischen sich dann die Buchstaben beider Seiten leicht durcheinander.

Ich will namentlich hier auch noch hervorheben, daß es mir gelingt, ganz schwache und zart gezeichnete Objekte des einen Sehfeldes zu sehen und dauernd zu beobachten, selbst wenn sie sich mit sehr kräftig gezeichneten Konturen des anderen Feldes decken. So kann ich die Faserung und die kleinen Fleckchen eines weißen Papierblattes verfolgen, während im anderen Felde stark gezeichnete schwarze Figuren stehen. Oder ich kann eine mit einem dünnen weißen Blatt zugedeckte und kaum erkennbare Druckschrift lesen, welche sich binokular etwa mit dem Gitter oder dem Kreuze der Fig. *W*, Taf. VI, deckt. Oder ich kann mittels eines Spiegels, den ich vor das eine Auge halte, das helle Bild des Fensters zur binokularen Deckung mit einer verhältnismäßig schwach erleuchteten Druckschrift bringen und diese lesen, ohne daß sie mir jemals durch das viel hellere Bild des Fensters verdrängt wird. Natürlich kann ich ebensogut das Spiegelbild des Fensters betrachten, wobei mir die Druckschrift verschwindet. Daß man bei einem solchen Versuche sehr schwach beleuchtete Objekte des einen Feldes nicht immer erkennen kann, wenn das andere Auge auf ein sehr helles Feld gerichtet ist, findet seine Erklärung dadurch, daß die Pupillen beider Augen unter dem Einflusse des hellen Lichts sich verengern und das Netzhautbild des dunkleren Feldes also wirklich noch sehr viel dunkler wird, als es ist, wenn das helle Bild verdeckt wird.

Aus den beschriebenen Erfahrungen geht hervor, daß der Mensch die Fähigkeit hat, die Bilder jedes einzelnen Sehfeldes einzeln und für sich wahrzunehmen, ungestört von dem anderen Sehfelde, wenn es nur mittels eines der angegebenen Hilfsmittel gelingt, die Aufmerksamkeit ganz auf die Objekte dieses einen Feldes zu fesseln. Diese Tatsache ist wichtig, weil aus ihr hervorgeht, daß der Inhalt jedes einzelnen Sehfeldes, ohne durch organische Einrichtungen mit dem des anderen verschmolzen zu sein, zum Bewußtsein gelangt, und daß die Verschmelzung beider Sehfelder in ein gemeinsames Bild, wo sie vorkommt, also ein psychischer Akt ist.

Um den Unterschied recht hervorzuheben, brauchen wir nur zu vergleichen die binokulare Verschmelzung der beiden schrägen und verschieden gerichteten Liniensysteme der Fig. *X*, Taf. VI, mit der monokularen Vereinigung beider in dem Liniensysteme der Fig. *W*. Wir können auch in dem letzteren die Linien des einen Systems zählen oder ihre Abstände vergleichen, dabei werden aber niemals die Linien des anderen Systems aus dem Bilde verschwinden, wie dies bei der binokularen Vereinigung unter diesen Bedingungen der Regel nach geschieht. Bei monokularer Betrachtung des kombinierten Liniensystems der Fig. *W* haben wir nur einen sinnlichen Eindruck, den wir durch keine Anstrengung der Aufmerksamkeit verändern können, wenn wir auch diese oder jene Züge desselben vorzugsweise beachten. Verschmölzen die beiden entsprechenden Bilder der Fig. *X* wirklich zu einem einzigen und einfachen sinnlichen Eindruck, so würde dieser durch Anstrengung der Aufmerksamkeit allein in keiner Weise in seine Bestandteile zu zerlegen sein. Charakteristisch ist es auch, daß wenn man mittels einer unbelegten Glasplatte im monokularen Gesichtsfelde das Bild des hellen Himmels mit einem bedruckten Blatt zum Decken bringt, man bei gewissen Beleuchtungsgraden die Buchstaben nicht lesen kann, während man sie sehr wohl lesen kann, wenn man binokular

den sehr viel stärkeren Reflex einer belegten Spiegelplatte mit ihnen zur Deckung bringt.

Der Wettstreit der Sehfelder, wie er sich bei binokularer Verschmelzung der obigen Bilder entwickelt, entspricht dem hin- und herschwankenden Zustande der nicht angestrengten und nicht interessierten Aufmerksamkeit, die von einem Eindruck zum anderen zu wandern pflegt und so allmählich eine Übersicht der vorliegenden Objekte gewinnt. Daß dieser Wechsel nicht auf einer organischen Einrichtung des Nervensystems beruht, wie Panum und E. Hering es auffassen, wenigstens auf keiner anderen, als die unseren Seelentätigkeiten zugrunde liegt, scheint mir evident aus der Tatsache der Selbstbeobachtung hervorzugehen, daß wir durch die bekannten und obengenannten rein psychischen Mittel, die Aufmerksamkeit zu fesseln, das Schwanken sogleich anhalten können, ohne daß dabei irgendeine eine bemerkbare Änderung der äußeren Umstände, der Richtung oder Bewegung der Augen und so weiter, stattfindet. Panum hat darin Recht, daß es nicht genügt die Aufmerksamkeit auf das verschwindende oder verschwundene Bild richten zu wollen, wobei er die Aufmerksamkeit für eine dem bewußten Willen des Beobachters absolut untertänige Tätigkeit erklärt Das letztere ist nun doch nur in gewisser Beschränkung richtig. Wir bewegen unsere Augen auch willkürlich, aber ein Ungeübter kann die Absicht, sie konvergieren zu lassen, nicht so unmittelbar ausführen. Wohl aber kann er in jedem Moment die Absicht ausführen, ein nahes Objekt anzublicken, wobei die Augen konvergieren. Ebensowenig können wir die Absicht, unsere Aufmerksamkeit an einem bestimmten Objekte festzuhalten, wenn wir uns diese Absicht in dieser Form innerlich aussprechen, erreichen, sobald das Interesse an dem Objekte erschöpft ist; aber wir können uns neue Fragen in bezug auf das Objekt stellen, so daß ein neues Interesse daran entsteht, und dann wird die Aufmerksamkeit gefesselt bleiben. Das Verhältnis ist also wie bei dem obengenannten Beispiele; es ist keine unmittelbare, sondern eine mittelbare Willkür. Wir können durch unseren Willen Akte ausführen bei denen das Auge oder die Aufmerksamkeit die Richtung erhält, die wir wünschen, obgleich wir nicht durch einen direkt darauf gerichteten Willensakt ohne Zwischenglieder die Richtung des Auges oder der Aufmerksamkeit bestimmen können. Dagegen trifft allerdings, wie ich wiederum gegen Panum behaupten muß, die andere charakteristische Eigenschaft der Aufmerksamkeit auch für den Wettstreit der Sehfelder zu, daß sie durch geeignete Methoden an die allerschwächsten Sinneseindrücke gefesselt werden kann, während die allerstärksten im anderen Sehfelde sie abzulenken streben. Natürlich ist dabei desto größere Anstrengung nötig, je ungünstiger das Verhältnis der Stärke für die beachteten Eindrücke ist.

Da wir nun übrigens, wie die oben beschriebenen Versuche mit momentaner Beleuchtung deutlich zeigen, imstande sind gleichzeitig eine gewisse Anzahl von Gegenständen zu beachten und dadurch einen gewissen Teil des Sehfeldes auszufüllen, so wird auch hierbei im allgemeinen zu erwarten sein, daß sich zunächst das Gesichtsfeld füllt mit denjenigen Objekten, die den stärkeren Eindruck machen, oder daß bei gleich starken Reizen in beiden Sehfeldern ein Schwanken eintritt, oder ein Suchen nach einem zusammenhängenden und verständlichen Eindrucke, wobei denn nicht notwendig immer im ganzen Gesichtsfelde nur der Eindruck des einen Auges vorzuherrschen braucht Charakteristisch für dieses Suchen nach einem verständlichen Eindruck ist

auch das fortdauernde Schwanken der Blicklinien. Es ist kaum möglich, die beiden Bilder in gleicher Lage dauernd in Deckung zu halten.

Etwas anderes ist es, wenn sich die beiden verschiedenen Bilder als sinnliches Zeichen eines äußeren Objekts betrachten lassen, dann wendet sich die Aufmerksamkeit sogleich der Wahrnehmung von diesem zu, ohne der Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder zugelenkt zu werden.

Was nun den merkwürdigen Einfluß der Konture in dem Wettstreit der Sehfelder betrifft, so bin ich ebenfalls der Meinung, daß derselbe im wesentlichen auf psychischer Gewöhnung beruht. Erwägen wir nämlich, in welcher Weise unser Auge das Gesichtsfeld zu durchmustern hat, um eine vollständige Kenntnis desselben zu erhalten, so ist klar, daß es ganz unnütze Mühe sein würde, dasselbe nacheinander auf alle einzelnen Punkte einer ausgedehnten gleichmäßig beleuchteten Fläche richten zu wollen; wir würden dadurch nichts weiter erkennen. Es genügt vielmehr den Blick über die Grenze der Fläche hinzuführen und auf alle diejenigen einzelnen Punkte zu richten, die sich von der Fläche abheben. Sobald dies geschehen ist, haben wir eine so genaue Kenntnis von der Fläche, als das Auge uns geben kann. Es sind deshalb namentlich die im indirekten Sehen sichtbaren Konture, den wir bei der Durchmusterung des Gesichtsfeldes erst unsere Aufmerksamkeit und dann unseren Blick zuzuwenden haben. Es ist bekannt, wie schwer es ist, einen kleinen Gegenstand der im indirekten Sehen nicht bemerkt wird, auf einer ausgedehnten hellen Fläche aufzufinden; bezeichnend nennt zum Beispiel Goethe die Lerche „im blauen Raum verloren“. Andererseits zieht ein etwas größerer und auch für das indirekte Sehen hinreichend scharf gezeichneter Gegenstand unmittelbar unseren Blick auf sich, und wenn man sich selbst bei der Betrachtung eines noch unbekannten Objekts beachtet, wird man leicht bemerken, wie man mit dem Blick den Konturen folgt. Gewöhnung und Übung müssen also notwendig dahin wirken, unsere Aufmerksamkeit den Konturen zuzuwenden. Auch bei den Kontrasterscheinungen habe ich darauf aufmerksam gemacht, wie die Konture namentlich in das Gewicht fallen.

Man könnte auch daran denken, daß die Erregung der Netzhautteile längs einer Grenze von Weiß und Schwarz lebhafter sei, so oft durch die Bewegungen des Auges Elemente der Netzhaut aus dem Schwarz in das Weiß rücken. Diese ausgeruhten Elemente würden allerdings stärker erregt werden, als die schon länger von Weiß getroffenen. Indessen glaube ich nicht, daß dieser Umstand hier wesentlich in Betracht kommt, weil wir bei den oben beschriebenen Versuchen die Richtung der Augenbewegungen ohne entscheidenden Einfluß gefunden haben, und weil die Konture in den Doppelbildern sich auch gleich beim ersten Aufschlag der Augen geltend machen, wo noch keine Nachbilder entwickelt sein können.

Panums Annahme dagegen, daß die Konture an und für sich die Netzhaut stärker erregen, scheint mir durch keine einzige sichere Tatsache unterstützt und zur Erklärung der hier vorliegenden Erscheinungen gänzlich unnötig zu sein. Bei den Kontrasterscheinungen haben wir allerdings gesehen, daß der Unterschied der Beleuchtung oder Färbung zweier Felder längs einer Kontur wo beide zusammenstoßen, stärker hervortritt als wenn beide voneinander getrennt sind, und sogar relativ zu groß erscheint. Wenn wir aber von den Nachbildern absehen, so lassen sich die Erscheinungen des simultanen Kontrastes darauf zurückführen, daß wir besser geübt und sicherer sind in der Vergleichung

der Beleuchtung zweier nebeneinander liegenden Netzhautpunkte, welche bei den Bewegungen des Auges viel häufiger unmittelbar hintereinander von derselben Beleuchtung getroffen werden, als dies bei entfernteren der Fall ist. Daß uns ein solcher Unterschied relativ zu groß erscheint und dadurch dann Irrtümer in der Beurteilung der Färbungen entstehen, entspricht der allgemeinen Regel, daß wir überhaupt deutlich wahrnehmbare Unterschiede für größer zu halten geneigt sind, als undeutlich wahrnehmbare. Man könnte einen solchen deutlicher wahrnehmbaren Unterschied vielleicht als einen stärkeren psychischen Reiz bezeichnen, und es mag zum Teil darin begründet sein, daß er die Aufmerksamkeit stärker zu fesseln strebt. Einen stärkeren Nervenreiz dabei anzunehmen, vorausgesetzt, daß Nachbilder vermieden werden, sehe ich keinen Grund.

Ähnliche Erscheinungen des Wettstreits treten nun auch ein, wenn beiden Augen verschiedenfarbige oder verschieden erleuchtete Felder dargeboten werden. Wenn man durch zwei verschiedenfarbige Gläser von lebhaften Farben, zum Beispiel mit dem rechten Auge durch ein rotes, mit dem linken durch ein blaues Glas, welche ungefähr gleiche Helligkeit haben, nach den äußeren Objekten sieht, so erblickt man diese fleckig rot und blau und zwar so, daß die Farben oft wechseln. Der unruhige sonderbare Farbenwechsel ist anfangs meist am lebhaftesten, bald stumpft sich die Empfindlichkeit für die Farben ab und das Aussehen wird dann ein ruhigeres in einer unbestimmten mehr grauen Farbe, welche noch stellenweise und zeitweise zwischen einem rötlicheren oder blaueren Tone wechselt, und welche manche Beobachter für die Mischfarbe aus den beiden vereinigten, also in diesem Falle für Rosa erklären. Ich selbst muß sagen, daß ich trotz vieler und mannigfach veränderter Versuche in keinem Falle die Mischfarbe mit einiger Evidenz habe sehen können. Zum Teil bestimmen auch die Eigentümlichkeiten der Objekte, ob man mehr die eine oder die andere Farbe sieht. Hellere Objekte erscheinen überwiegend rot, dunklere blau, wohl deshalb, weil überhaupt bei größerer Lichtstärke Rot, bei schwächerer Blau in der Empfindung überwiegt. Objektiv rote Objekte erscheinen natürlich auch rot, blaue blau, weil ein jedes durch das gleichnamige Glas gesehen heller erscheint, als durch das anders gefärbte. Auch hier spielt wieder die Aufmerksamkeit auf das eine oder andere Feld eine merkliche Rolle. Obgleich es sehr schwer ist, die Aufmerksamkeit gerade nur der Farbe des einen Feldes zuzuwenden, wenn sie dabei nicht unterstützt ist durch Konture, die diesem Felde angehören, so gelingt es doch einzelnen Beobachtern FUNKE[1], J. DINGLE, VOELCKERS[2], VOLKMANN[3], E. A. WEBER[4], WELCKER[5], mir selbst), die Aufmerksamkeit auf das rechte Auge und was es sieht, und dann ebenso auf das linke zu fixieren, wobei denn auf den Objekten die Farbe des zugehörigen Glases zum Vorschein kommt. FECHNER[6], dem der Wechsel durch willkürliche Anstrengung weniger gut gelang, glaubt diesen Wechsel von einer unwillkürlichen Bewegung oder Kompression des Auges ableiten zu dürfen, welche nach seinen Beobachtungen nur überhaupt den Wechsel der Farbe begünstige, aber nicht

[1] Lehrbuch der Physiologie. 1. Aufl. Bd. II, 875.
[2] MÜLLERS Archiv. 1838, p. 61 und 63.
[3] Neue Beiträge zur Physiol. des Gesichts. p. 97, 99.
[4] Programma Colleg. 118.
[5] Über Irradiation. 1852, p. 107.
[6] Abhandl. der Sächs. Ges. d. Wiss. VII (1860), 399—408.

gerade den Wechsel in der beabsichtigten Richtung. Sehr viel besser noch gelingt der Versuch, wenn man die Gläser so hält, daß Spiegelbilder schwach erleuchteter, seitwärts liegender Gegenstände von ihnen in das Auge geworfen werden. So wie man nun die Aufmerksamkeit einem dieser Spiegelbilder zuwendet, sei es ein noch so schwach sichtbares Schattenbild, so erscheint sogleich an der betreffenden Stelle des Sehfeldes die Farbe des betreffenden Glases. Und wenn in derselben Stelle des Gesichtsfeldes gleichzeitig ein Spiegelbild des anderen Glases sichtbar ist und man wendet diesem die Aufmerksamkeit zu, so tritt auch die andere Farbe hervor.

Um diesen Versuch methodisch auszuführen, stellte ich eine blaue und rote Glasplatte (*B* und *R* in Fig. 75) senkrecht auf einen Tisch; *C* ist ein dunkler Schirm, der an der nach *B* gekehrten Seite ein mit Buchstaben bedrucktes Blatt trägt, *D* ein eben solcher, an dessen innerer Seite irgend ein anderes mit den Buchstaben nicht leicht zu verwechselndes Muster, also etwa eine Zahlentabelle angebracht ist. Bei *A* befindet sich ein weißer Schirm, *O* und *O'* sind die Augen des Beobachters. Die Beleuchtung regelt man so, daß die Buchstaben und die Zahlen, welche der Beobachter in ihren von den Glasplatten entworfenen Spiegelbildern sieht, eben noch sichtbar sind, wenn der Bogen *A* stark beleuchtet ist. Scheinbar liegen für den Beobachter die Spiegelbilder der Buchstaben und Zahlen auf dem Bogen *A*. Ich sehe nun ganz regelmäßig, wenn ich den Buchstaben mit dem Auge zu folgen suche, den Grund blau, wenn ich den Zahlen folge, dagegen rot. Also die auf das Bild der einen Netzhaut gerichtete Aufmerksamkeit bringt auch den zugehörigen farbigen Grund zum Vorschein. Hierbei ist noch zu bemerken, daß die Konturen, welche in diesem Falle den einen Eindruck überwiegen machen, Grenzen von Weiß und Schwarz sind, ohne daß die Intensität der sichtbar werdenden Grundfarbe an ihnen eine Veränderung erleidet. Oder wenn man die ganze gemischte Beleuchtung zusammennimmt, so erscheinen die Buchstaben links reinblau auf weißlichem Blau, die Zahlen rechts reinrot auf weißlichem Rot. Bei den Kontrasterscheinungen würde die Aufmerksamkeit nur dem Gegensatz von Schwarz und Weiß, nicht dem Blau oder Rot zugelenkt werden, was bei den hier beschriebenen binokularen Versuchen gerade im Gegenteil geschieht.

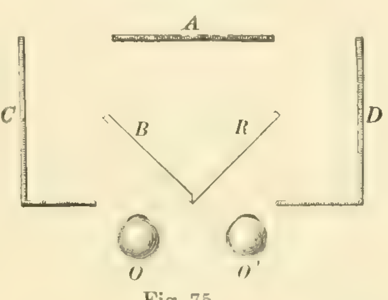


Fig. 75.

Noch einfacher gelingt mir dieser Versuch sehr leicht und gut, wenn ich nach dem Himmel blicke und vor das eine Auge ein rotes, vor das andere ein blaues Glas nehme, beide aber so gegen die Gesichtslinien neige, wie in Fig. 75, daß ich in jedem der Gläser schwache Spuren der Spiegelbilder seitlich gelegener Objekte sehe, und nun bald das eine, bald das andere Glas ein wenig bewege, so daß sich auch die von ihnen entworfenen Spiegelbilder ein wenig bewegen. Achtet man auf diese bewegten Bilder, die übrigens ganz verwaschen und lichtschwach sein dürfen, so tritt sogleich am Himmel die Farbe des entsprechenden Glases heraus. Es ist ein wunderliches Schauspiel, wenn so plötzlich, wie auf Kommando, der blaue Himmel ganz rot, oder der rote ganz blau wird.

Ob bei der binokularen Deckung verschiedenfarbiger Felder die Mischfarbe

gesehen werde, oder nicht, darüber sind verschiedene Beobachter direkt entgegengesetzter Meinung. Während H. Meyer, Volkmann, Meissner, Funke, denen ich mich selbst auch anschließen muß, niemals die Mischfarbe gesehen haben, erklären ebenso entschieden Dove, Regnault, Brücke, Ludwig, Panum, Hering, daß sie sie gesehen haben, und zwar nicht bloß bei matten und weißlichen Farben, sondern selbst bei gesättigten. Dove berichtete, daß er sie selbst an den allergesättigtesten Farben, denen des prismatischen Spektrums gesehen habe, indem er ein objektiv auf die Wand geworfenes Spektrum gleichzeitig mit einem umkehrenden und einem nicht umkehrenden Fernrohr binokular betrachtete. Außerdem empfiehlt er als besonders geeignet Polarisationsfarben. Wenn man vor eine schwarze Glasplatte, die das Licht unter dem Polarisationswinkel reflektiert, dünne Glimmer- oder Gipsblättchen in passender Lage anbringt, und vor das rechte Auge ein Nicolsches Prisma in der Lage hält, wo es das von der Glasplatte reflektierte Licht im Maximum durchläßt, vor das linke Auge ein ebensolches Prisma, um einen rechten Winkel gedreht, so daß es das reflektierte Licht nicht durchgehen läßt, so sieht man mit beiden Augen die Kristallblättchen farbig, und zwar zeigen sie für beide Augen genaue Komplementärfarben. Dove und Regnault haben nun in solchen Fällen diese Komplementärfarben sich binokular zu Weiß vereinigen gesehen. Ich habe diese Versuche wiederholt und mir sind sie regelmäßig und vollständig mißlungen. Ich sehe sowohl mit spektralen als mit Polarisationsfarben genau denselben Wettstreit und Wechsel der verschiedenen einfachen Farben, ohne daß die Mischfarbe zum Vorschein kommt, wie bei Pigmentfarben und den Farben gefärbter Gläser. Ich habe auch senkrecht zur Achse geschnittene Quarzplatten zu diesen Versuchen sehr vorteilhaft gefunden. Wenn man die Nicolschen Prismen vor den Augen dreht, kommen neue Farben zum Vorschein. Ich sehe aber immer beide Farben getrennt, und gleichsam eine durch die andere, und kann immer augenblicklich angeben, ohne ein Auge zu schließen, welche Farben da sind. Zur Vergleichung mit den Farben hat man dabei den hellweißen Grund der spiegelnden Platte, der die Mischfarbe zeigt, welche zum Vorschein kommen sollte, und eben deshalb ist es leicht, bei diesen Versuchen den großen Unterschied zwischen der binokularen Vereinigung verschiedener Farben und ihrer wirklichen Vereinigung zu erkennen.

Obgleich ich einsehe, wie mißlich es ist, so vielen ausgezeichneten und zuverlässigen Beobachtern in einer Sache zu widersprechen, in der vielleicht außerordentlich große individuelle Unterschiede bestehen, so will ich hier doch einige Umstände anführen, welche bei meinen eigenen Versuchen zuweilen den Schein einer Mischfarbe hervorbrachten, während sich bei genauerer Untersuchung herausstellte, daß für mein Auge wenigstens eine solche nicht vorhanden war.

Zuerst ist folgendes zu bemerken: Wenn man die binokulare Kombination zweier Farben vor sich hat und außerdem auch noch beide Komponenten einzeln, wenn man also z. B. mit parallelen Augenachsen nach einem blauen Felde blickt, welches seitwärts an ein rotes anstößt, so daß ein Doppelbild der Grenzlinie erscheint und auf der einen Seite sich Blau mit Blau, auf der anderen Rot mit Rot, in der Mitte aber Rot mit Blau deckt, so unterscheidet sich das mittlere Blau von dem reinen Blau an seiner Seite allerdings dadurch, daß zu ihm im Gesichtsfelde auch noch mehr oder weniger Rot hinzukommt, und jemand, der die Mischungsregeln der Farben kennt und gewöhnt ist, aus Blau

und Rot sich Violett oder Purpur zusammensetzen zu sehen, könnte dies mit Rot zusammengesetzte Blau nun wohl für Violett erklären. Auch kommt es ja selbst im monokularen Felde vor, daß wirklich bestehendes Violett vermittels des Kontrastes gegen nebenstehendes Blau, oder weil das Blau einer über die Farben hingebreiteten Decke oder der Gesamtbeleuchtung des Feldes anzugehören scheint, vom Beobachter in Blau und Rot aufgelöst wird. Wir haben Beispiele der Art im 24. Paragraphen besprochen. Es kann also wirklich monokular zu Violett vereinigtes Rot und Blau unter Umständen so getrennt erscheinen, wie das binokular sich deckende für meine Augen immer erscheint, und dadurch kann ein solcher Beobachter vielleicht verleitet werden zu glauben, daß wo er Blau und Rot gleichzeitig sieht, daß da Violett oder Purpur sei. Wenn man nun aber die wirkliche Mischfarbe der beiden gesehenen Farben zur Erscheinung bringt, so tritt der Unterschied schlagend hervor. Die beste und genaueste Methode die Mischfarbe hervorzubringen, ist folgende. Man legt zwei blaue und zwei rote quadratische Felder wie die eines Schachbretts zusammen, so daß z. B. das rechte obere und linke untere blau, das linke obere und rechte untere rot sind. Dann bringt man vor jedes Auge ein doppeltbrechendes achromatisiertes Kalkspatprisma in derjenigen Stellung, daß es übereinander liegende Doppelbilder gibt. Indem die Doppelbilder der farbigen Felder sich teilweis übereinander schieben, entsteht für jedes Auge längs der horizontalen Trennungslinie der farbigen Felder ein aus Rot und Blau monokular gemischter, also rosaroter Streifen. Jetzt blickt man mit parallelen Gesichtslinien nach den Feldern hin, so daß ihre Bilder sich binokular übereinander schieben. Dann hat man oben rechtes Blau und linkes Rot sich deckend, in der Mitte Rosarot mit Rosarot, unten rechtes Rot mit linkem Blau. Unter diesen Umständen ist es für meine Augen ganz deutlich, daß in der binokularen Kombination von Blau und Rot keine Spur von dem Rosenrot, wie es der mittlere Streifen zeigt, enthalten ist, sondern nur die beiden einzelnen Farben getrennt.

Panum legt Gewicht darauf, daß die binokular zu mischenden Farben nicht zu lebhaft und nicht zu verschieden sein dürfen, weil sonst der Wettstreit der Sehfelder zu lebhaft und unruhig sei, und man dadurch verhindert werde die Mischfarbe zu erkennen. Ich habe deshalb nach der bei den Kontrasterscheinungen schon früher beschriebenen Methode von H. Meyer die zu kombinierenden farbigen Felder mit feinem weißen Papier überdeckt, so daß durch das Papier die unterliegenden Farben nur schwach durchschimmerten. Als ich nun diese sehr weißlichen Farben zur Deckung brachte, glaubte ich in der Tat zuerst wirklich eine Mischfarbe zu sehen. Indessen wenn ich die wirkliche Mischfarbe der beiden Felder auch noch daneben brachte, erkannte ich wieder den Wettstreit der Sehfelder in den binokular gedeckten Feldern.

Zuweilen gelingt es, unter einer Auswahl farbiger und grauer Papiere einzelne zu finden, die genau die Mischfarbe zweier anderen, wie sie durch ein doppeltbrechendes Prisma hergestellt wird, darbieten; dann werden die Versuche noch leichter und schlagender. Ich legte nebeneinander ein Blatt von grünem und rosenrotem Glanzpapier, so daß ihre Grenzlinie vertikal war. Quer darüber, also horizontal, legte ich einen Streifen grauen Papiers, welches der Mischfarbe von jenen beiden Farben entsprach. Das Ganze wurde mit feinem weißen Papier überdekt. Wenn ich nun diese Felder mit einem doppeltbrechenden Prisma so ansah, daß die Doppelbilder horizontal auseinander geschoben wurden, so deckte sich längs des horizontalen grauen Streifens Grau

mit Grau, darüber und darunter in der Mitte Rosa mit Grün, welche ebenfalls Grau gaben, und dieses letztere Grau ging ununterscheidbar über in das Grau des horizontalen Streifens. Wenn ich aber nach Entfernung des doppeltbrechenden Prismas binokulare Doppelbilder erzeugte, so hob sich der Streifen, wo Grau auf Grau lag, sehr entschieden ab von dem, wo Rosa auf Grün lag, und im letzteren erschienen wieder die beiden Farben nebeneinander. Nahm ich aber den mittleren grauen Streifen fort, so erkannte ich den Wettstreit der Sehfelder nicht mehr deutlich und bemerkte dann in diesem Felde nur das Gemeinsame beider Farben, nämlich das Weiß.

In anderen Fällen sind es Nachbilder, die eine scheinbare Mischung hervorbringen. Dazu läßt sich sehr gut die eben beschriebene Anordnung benutzen: oben ein grauer Streifen, unten rechts grün, links rosenrot, welche beide letzteren Farben, durch das doppeltbrechende Prisma gemischt, das obere Grau geben. Ich bringe die beiden unteren Felder zur binokularen Deckung und sehe anfangs nur lebhaften Wettstreit zwischen ihnen. Wenn ich aber lange anhaltend fixiere, fängt endlich das binokular gemischte Feld an, dem oberen Grau ähnlich zu werden, und nur wenig bald nach der Seite des Rot, bald nach der des Grün hin abzuweichen. Wenn ich aber nun das Rot mit Grün bedecke und dabei das eine oder andere Auge schließe, so erscheint mir das Nachbild des Grün auf Grün, während in dem Teile des Feldes, wo vorher Rosa lag, jetzt das reine gesättigte Grün sichtbar wird. Da sieht man denn sehr deutlich, daß das durch Ermüdung veränderte Grün in der Tat dem Grau des oberen Streifens sehr ähnlich geworden ist. Dasselbe findet man am Rosarot, wenn man das Grün verdeckt. Die scheinbare Mischung der Farben zu Weiß beruht also in diesem Falle darauf, daß die Farben selbst in der Empfindung infolge der entstehenden komplementären Nachbilder dem Grau viel ähnlicher geworden sind, und daß der Unterschied und Wettstreit der einander ähnlich gewordenen Farben zuletzt nicht mehr so auffällt, wie der der ursprünglichen lebhaften.

In gewissen Fällen kann die in § 24 erwähnte Induktion der Farbe des Grundes über ein kleines andersfarbiges Feld scheinbare binokulare Mischung hervorbringen. Ich betrachtete einen blauen horizontalen Streifen auf rotem Grunde längere Zeit in Doppelbildern in starrer Fixation, indem ich ein schwarzes auf dem Blau angebrachtes Pünktchen mit einem ebensolchen auf dem Rot binokular vereinigte. Anfangs sah ich nur den Wettstreit des Rot und Blau auf dem Teil des Feldes, wo sich Rot und Blau deckte. Endlich aber bemerkte ich, daß wirkliches Violett eintrat. Als ich aber nun das eine Auge schloß, erkannte ich das induzierte Rot auch monokular auf dem blauen Streifen.

Am auffallendsten endlich finde ich den Schein einer binokularen Mischung in einem schon von H. Meyer und Panum[1] besprochenen Falle. Es befinde sich rechts ein gelbes Feld, auf dem horizontal ein rosenroter Streifen liegt, links ein blaues mit einem vertikalen Streifen von demselben Rosenrot. Man bringe das gelbe und blaue Feld zur binokularen Deckung, so daß die beiden rosenroten Streifen sich scheinbar kreuzen, so erscheint der linke, welcher größtenteils auf das gelbe Feld fällt, allerdings viel gelblicher, als der rechte,

[1] Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858. S. 41. Fig. 27 und 29.

der sich größtenteils mit dem blauen Felde deckt. In der Mitte, wo beide Felder sich kreuzen, sieht man reines Rosenrot, oder vielmehr, wie mir scheint, das gelbliche Rosenrot des einen geht hier unter dem bläulichen Rosenrot des anderen Streifens gleichsam unverschmolzen hindurch. PANUM betrachtet die gelbliche Färbung des einen Rosenrot, die bläuliche des anderen als Folge ihrer binokularen Mischung mit der Farbe des gegenüber stehenden Feldes. Zu beachten ist hierbei, daß die Veränderung der beiden rosaroten Streifen am lebhaftesten wird, wenn man den Blick wandern läßt, weil dann der auf Gelb liegende das blaue Nachbild des Gelb bekommt, der auf Blau liegende das gelbe Nachbild des Blau. Aber in schwächerem Grade ist die Wirkung allerdings auch bei fest fixierendem Blick vorhanden. Doch kann man auch in diesem Falle sich überzeugen, daß man es hier zunächst mit einer Kontrastwirkung zu tun hat. Die veränderte Färbung des Rosarot bleibt nämlich auch bestehen, wenn man durch Schluß des anderen Auges die binokulare Mischung aufhebt. Man schließe das rechte Auge, welches nach dem gelben Felde gerichtet ist, so bleibt der rosenrote Streifen auf dem noch übrigen blauen Felde so gelblich, wie er vorher war. Im Moment des Augenschlusses verschwindet freilich noch das ihn binokular deckende Gelb, wie eine Art gelben Nebels, durch welchen hin man ihn sah, aber die scheinbare Färbung des Rosenrot selbst bleibt dabei ganz unverändert. Ebenso erscheint der rosenrote Streifen auf dem Gelb unverändert bläulich rot, wenn man auch das nach dem Blau blickende linke Auge schließt. Daraus folgt also, daß die Veränderung des Rosa nicht oder wenigstens nicht allein, von binokularer Mischung herrührt, sondern eine Kontrastwirkung ist. Schon von Anfang an, auch bei monokularer Betrachtung, erscheint das Rosa auf dem blauen Felde durch Kontrast gelblicher, das auf dem gelben Felde bläulicher. Sobald man die beiden Felder zur Deckung bringt, wird die Kontrastwirkung allerdings viel lebhafter; ist sie aber einmal so lebhaft entwickelt, so schwindet sie auch nicht wieder, wenn man selbst ein Auge schließt und somit die binokulare Deckung aufhebt. Bei jedem Kontraste ist die Beurteilung der Farbe, wie wir uns im 24. Paragraphen zu zeigen bemühten, innerhalb eines gewissen Intervalls unsicher. Nebenumstände bewirken, daß man die gesehene Farbe eher nach der einen Seite dieses Intervalls, als nach der anderen verlegt. Bei dem hier besprochenen Versuche kann die binokulare Deckung mit der Komplementärfarbe des Grundes, auf dem der rosarote Streifen liegt, wohl als ein solcher Nebenumstand betrachtet werden. Übrigens komme ich unten noch auf die Lehre von den binokularen Kontrasten wieder zurück.*

Was die Theorie der binokularen Zusammensetzung der Farben betrifft, so ist diese, wenn wir von TH. YOUNGS Farbentheorie ausgehen, von ihrer monokularen Mischung nur dadurch unterschieden, daß die den drei verschiedenen Grundfarben entsprechenden Nervenfasern, welche in verschiedenem Grade gereizt werden, dort auf beide, hier nur in einer Netzhaut verteilt sind. Die drei verschiedenartigen Nervenfasern, welche demselben Punkte einer Netzhaut angehören, haben entweder dasselbe Lokalzeichen, oder wenn sie verschiedene Lokalzeichen haben, so kann doch keine mögliche Erfahrung vorkommen, bei der sie durch Objekte, die in verschiedenen Teilen des Gesichtsfeldes lägen, erregt würden. Eine Veranlassung zu getrennter Lokalisation dieser Empfin-

* Über binokulare Farbenmischung vgl. Anm. 1 am Schlusse des Paragraphen. K.

dungen in bezug auf die Richtungen im Sehfeld kann also nicht vorkommen. Ihre verschiedenen Empfindungen verschmelzen also in eine zusammengesetzte Empfindung, die Empfindung einer Mischfarbe, welche der Regel nach als das sinnliche Zeichen für eine bestimmte Beschaffenheit des örtlich einfachen Objekts auftritt, das sich in jenem Teile des Sehfeldes befindet. Und doch haben wir gesehen, daß auch bei monokularer Mischung Fälle eintreten, wo wir eine der zusammengesetzten Farben durch die andere hindurch zu sehen glauben, wenn entweder die ungleichmäßige Verteilung des Lichts, oder die Bewegung eines örtlich begrenzten Bildes, oder die Anwesenheit eines Teils der Farbe im ganzen Gesichtsfelde uns darauf hinleiten, eine farbige Beleuchtung oder eine farbige Decke von einem farbigen Objekte zu trennen.

Bei ungleichartiger Beleuchtung korrespondierender Teile beider Netzhäute ist nun der Eindruck ein solcher, wie er bei einer von allen Seiten gleichmäßigen Beleuchtung eines einfachen Objekts niemals vorkommen kann. Dennoch versetzen wir (aber wahrscheinlich nicht infolge einer angeborenen Einrichtung unseres Nervensystems, sondern nur infolge von Einübung) beide Farben in eine und dieselbe Gegend des gemeinsamen Gesichtsfeldes. So sieht man also zwei Farben in dem gleichen Felde und empfindet jede getrennt von der anderen. Am ähnlichsten ist dieses Gesichtsbild jedenfalls denjenigen Fällen monokularer Mischung, wo wir zwei farbige Objekte hintereinander in der gleichen Stelle des Sehfeldes sehen oder zu sehen vermeinen, und von einer Zahl der Beobachter, wozu ich mich selbst rechnen muß, wird die Sache also auch jedenfalls nur so gesehen. Dabei tritt das Schwanken der Aufmerksamkeit ein, die sich entweder dem einen oder anderen Felde zuwendet, und gibt sich als Wettstreit zu erkennen. Etwas dem Wettstreit ähnliches, nur sehr viel schwächer entwickelt, kann man übrigens auch im monokularen Felde sehen, wenn man mittels einer unbelegten Glasplatte das Spiegelbild eines Objektes mit dem durch die Platte gesehenen anderen Objekte zum Decken bringt, vorausgesetzt, daß beide nahehin gleich hell und deutlich gezeichnet sind, aber ganz verschiedenes Muster haben. Dann kann man entweder das eine oder andere Objekt betrachten, das nicht beachtete tritt auch in diesem Falle mehr zurück, wenn es auch nie so vollständig schwindet, wie bei binokularer Deckung. Durch kleine Bewegungen der reflektierenden Platte kann man sich nötigenfalls die Trennung der beiden Bilder sehr erleichtern.

Da übrigens nach Youngs Theorie die Anschauung von Mischfarben doch immer nur darauf beruht, daß drei verschiedene Farbenempfindungen in dieselbe Stelle des Sehfeldes hinein projiziert werden, und es selbst bei monokularer Mischung nur auf einem je nach den Nebenumständen verschieden ausfallenden Akte des Urteils beruht, ob dieselben als sinnliches Zeichen einer einfachen Qualität eines Objektes oder zweier verschiedenen Qualitäten zweier Objekte angesehen werden, so erscheint es andererseits nicht unmöglich, daß bei der binokularen Deckung zweier Farben von der Verschiedenheit, welche zwischen dieser Art des Eindrucks und dem der monokularen Mischung stattfindet, abgesehen werde, und die Farben so vereinigt wie bei letzterer angesehen werden. Nach Youngs Farbentheorie ist die Mischfarbe ja auch weiter nichts als die Addition dreier verschiedenartiger, sich sonst gegenseitig nicht beeinflussender Eindrücke, welche dieselbe Lokalisation haben, und die Urteilsakte, nach denen bald Vereinigung, bald Trennung eintritt, können bei verschiedenen Beobachtern je nach Einübung und verschiedener individueller Erfahrung natürlich sehr ver-

schieden ausfallen. Daß dabei die Vereinigung sehr ähnlicher Farben, die also viel Gemeinsames und wenig Verschiedenes haben, leichter erfolgen kann, als die sehr verschiedener, ist an und für sich selbstverständlich. Dazu kommt auch noch, daß kleine Verschiedenheiten des Eindrucks auf beide Augen häufig auch bei Betrachtung desselben reellen Objekts vorkommen können, wenn das eine Auge mehr ermüdet oder ausgeruht ist als das andere, oder wenn seitlich sehr helles oder farbiges Licht einfällt, welches in ihm zerstreut wird, und so weiter. Die Ausgleichung solcher kleinerer Verschiedenheiten kann also zur Sache der Gewohnheit werden und übersehen werden. Wenn man freilich ein Feld, welches einen solchen Eindruck darbietet, dicht neben ein anderes stellt, in welchem zwei gleiche Farben zur Deckung kommen, so erkennt man die Verschiedenheit und bemerkt den Wettstreit, der auch zwischen wenig differenten Eindrücken vor sich geht.

In ganz eigentümlicher Weise endlich macht sich die binokulare Kombination verschieden farbiger oder verschieden beleuchteter Felder geltend in stereoskopischen Zeichnungen. Macht man nämlich in dem einen von zwei zusammengehörigen Bildern eines Körpers eine Fläche weiß, die man in dem anderen Bilde schwarz läßt, oder gibt man ihnen verschiedene, am besten nicht zu sehr verschiedene Farben, so erscheint eine solche Fläche in der stereoskopischen Kombination glänzend, während alle diejenigen Teile des Körpers, die in beiden Zeichnungen gleiche Färbung und Beleuchtung haben, matt erscheinen. Übrigens ist dieser Schein des Glänzenden oder Matten durchaus unabhängig davon, ob die Flächen der Zeichnung wirklich matt oder glänzend sind, vorausgesetzt, daß sie im letzteren Falle nicht gespiegeltes Licht in das Auge des Bebachters zurückwerfen.

Man kann sogar stereoskopische Linienzeichnungen, zum Beispiel von Kristallmodellen, einerseits mit schwarzen Linien auf weißem Grunde, andererseits mit weißen Linien auf schwarzem Grunde ausführen und solche Zeichnungen stereoskopisch kombinieren. Man erhält dabei den Eindruck, als wäre der Körper, den man sieht, aus einer dunklen glänzenden Masse, wie Graphit, ausgeführt und läge auf einer Fläche von Graphit. Ein solches Beispiel zeigt Fig. *Q*, Taf. IV.

Auch in photographischen Stereoskopbildern von glänzenden Gegenständen, z. B. glänzenden Pflanzenblättern, Atlas usw., wird man häufig Stellen finden, welche in beiden Zeichnungen verschieden helle Reflexe zeigen und in dem kombinierten Bilde den Eindruck des Glanzes hervorrufen. Am ausgezeichnetsten vielleicht ist dieser Eindruck auf momentanen Photographien einer welligen, von der Sonne beschienenen Wasserfläche. Ebenso wird man sich bei Betrachtung objektiver glänzender Körper sehr oft überzeugen können, daß einzelne Stellen derselben dem einen Auge einen viel stärkeren Reflex zusenden als dem anderen.

Hierin scheint mir auch der Grund zu liegen, warum in stereoskopischen Zeichnungen verschieden beleuchtete Flächen kombiniert glänzend erscheinen. Wenn eine matte Oberfläche von Licht getroffen wird, so sendet sie dieses Licht gleichmäßig nach allen Richtungen in der Weise zurück, daß sie von allen Richtungen aus gesehen gleich hell erscheint. Folglich wird sie auch unter den normalen Bedingungen des Sehens unseren beiden Augen immer gleich hell erscheinen. Glänzende Flächen dagegen sind solche, die eine mehr oder weniger regelmäßige spiegelnde Reflexion zeigen. Sie können eine Menge

größerer oder kleinerer hügeliger Unebenheiten zeigen; wenn die Oberfläche dieser Hügel poliert ist und überwiegend einer bestimmten Richtung sich nähert, so werden sie doch auffallendes Licht in überwiegender Menge in derjenigen Richtung zurückwerfen, in der eine regelmäßig spiegelnde Fläche alles Licht zurückwerfen würde. Unter diesen Umständen wird es oft vorkommen, daß eines unserer Augen sich in der Richtung des zurückgeworfenen Lichts befindet, das andere nicht. Dem ersteren erscheint dann die betreffende Fläche stark erleuchtet, dem anderen schwach. Sehen wir also im Stereoskope an dem Bilde eines Körpers eine Fläche mit beiden Augen verschieden stark erleuchtet, so erhalten wir einen sinnlichen Eindruck, den in Wirklichkeit nur glänzende, aber niemals matte Flächen hervorbringen können, und die betreffende Fläche erscheint uns deshalb glänzend.

Ebenso kann es vorkommen, daß ein glänzender Körper, der von farbigen umringt ist, dem einen Auge reflektiertes Licht von einer, dem anderen von anderer Farbe zusendet, also beiden Augen verschiedenfarbig erscheint, während ein matter Körper unter den normalen Bedingungen des Sehens notwendig beiden Augen immer gleichfarbig erscheinen muß. Wenn also im Stereoskop dieselbe Fläche in der einen Zeichnung anders gefärbt ist als in der anderen, so erregt uns das einen sinnlichen Eindruck, wie ihn nur glänzende Körper hervorbringen können. Da sich in der Regel die Farbe des glänzenden Körpers selbst mit der der beiden Reflexe mischt und die letzteren selten ganz rein nur die eine Farbe reflektieren, so sind die Unterschiede in der Färbung solcher Reflexe glänzender Körper für beide Augen in der Regel nicht sehr groß, und dementsprechend gelingt es besser Glanz hervorzubringen durch Verbindung von Farben, die nicht sehr verschieden sind, als durch sehr glänzende und sehr differente. Letztere lassen mehr Wettstreit als Glanz sehen.

Nach den Beobachtungen von Wundt tritt der Glanz in der Kombination zweier farbigen Felder am besten hervor, wenn beide ungefähr gleich stark mit dem Grunde, auf dem sie liegen, kontrastieren, schwächer, wenn eines viel stärker kontrastiert; dann überwiegt nämlich dasselbe im Wettstreite der Sehfelder zu sehr und unterdrückt das andere. Legt man zum Beispiel ein helles gelbes und ein dunkles blaues Quadrat von gleicher Größe auf weißen oder schwarzen Grund, und bringt sie zur binokularen Deckung, so unterscheidet sich im einen Falle das Gelb zu wenig vom weißen Grund, im anderen das Blau zu wenig vom schwarzen Grunde, und der Glanz ist viel schwächer, als wenn man beide Quadrate auf grauen Grund legt, der sich von beiden gleich stark unterscheidet.

Auch dadurch, daß man auf dem einen Quadrate Zeichnungen mit scharfen Konturen anbringt, kann man dieses im Wettstreit so begünstigen, daß die Erscheinung des Glanzes undeutlich wird.

Auch kann man binokularen Glanz hervorbringen, ohne gerade stereoskopische Zeichnungen zu benutzen, wenn man durch zwei verschieden gefärbte Gläser nach buntgefärbten Objekten hinsieht, zum Beispiel durch ein blaues und ein rotes Glas nach einem in Blau und Rot ausgeführten Muster. Durch jedes Glas erscheint die gleichnamige Farbe hell, die andere dunkel, und man sieht das Muster sehr auffallend glänzend. Wichtig ist dabei die Bemerkung von Dove, daß, wenn im Wettstreit der Augen die eine oder andere Farbe sich ganz hervordrängt, der Glanz verschwindet, im Moment des Übergangs aber, wo beide nebeneinander sichtbar sind, der Glanz auftritt.

Der Metallglanz ist dadurch charakterisiert, daß das regelmäßig reflektierte Licht selbst schon gefärbt und nicht weiß ist, wie das der durchsichtigen Stoffe. Metallglanz kommt deshalb auch Körpern zu, welche die Farben dünner Blättchen geben, wie bunte Vogelfedern, und gewissen stark gefärbten und brechenden Stoffen wie Indigo.

Die Erscheinung des stereoskopischen Glanzes ist für die Theorie der Tätigkeit beider Netzhäute deshalb von Interesse, weil daraus mit Sicherheit hervorgeht, was bei den verschiedenen Aussagen verschiedener Beobachter über die Erfolge der binokularen Deckung verschiedener Bilder vielleicht zweifelhaft bleiben könnte, daß zwei heterogene Lichtwirkungen auf korrespondierende Netzhautstellen stets einen durchaus anderen sinnlichen Eindruck machen, als zwei gleichartige Einwirkungen auf dieselben Stellen. Wenn das eine Auge Schwarz sieht und das andere in dem korrespondierenden Teile des Sehfeldes Weiß, so ist der sinnliche Eindruck der einer glänzenden weißlichen Fläche. Wenn wir aber das weiße Licht, was bisher auf die eine Seite allein fiel, auf beide Seiten gleichmäßig verteilen, also Grau mit Grau kombinieren, so gibt das den Eindruck von mattem Grau, welcher ganz bestimmt unterschieden ist von dem Eindruck des glänzenden Weiß, den die erste Kombination machte.

Dasselbe gilt für den durch binokulare Vereinigung verschiedener Farben erzeugten Glanz.

Man kann zwar denselben Schluß schon aus der Tatsache ziehen, daß zwei stereoskopische Zeichnungen, binokular kombiniert, nicht so erscheinen, als wären alle Linien auf dasselbe Blatt aufgetragen, sondern den Eindruck eines Körpers geben. Indessen ist hierbei allerdings der Einfluß der Augenbewegungen von Wichtigkeit, und nur bei momentaner Beleuchtung durch den elektrischen Funken fällt dieser ganz weg.

Ich bemerke noch, daß ich auch solche Zeichnungen, welche stereoskopischen Glanz zeigen, bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken betrachtet habe, und daß auch hierbei der Eindruck des Glanzes vollkommen zur Erscheinung kommt. Diese Tatsache ist wichtig, weil dadurch die Erklärung beseitigt wird, daß der Glanz auf dem Wechsel der Beleuchtung und Färbung beruht, den der Wettstreit verursacht. Den Wechsel im Wettstreit bei nicht angestrengter Aufmerksamkeit habe ich nie schneller als in Perioden von etwa 8 Sekunden, meist aber sehr viel langsamer vor sich gehen sehen. Wenn nun auch der Lichteindruck in der Netzhaut einen kleinen Bruchteil einer Sekunde dauert, so ist während dieser Zeit keine merkliche Änderung durch den Wettstreit der Sehfelder möglich. Man kann aber in dieser kurzen Zeit erkennen, daß man die beiden verschiedenen Eindrücke beider Sehfelder gleichzeitig und in derselben Stelle des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes sieht.

Den Eindruck des Glanzes können übrigens auch monokular gesehene Bilder und Objekte hervorbringen, zum Beispiel dadurch, daß ihre Beleuchtung bei Bewegungen des Beobachters sich schnell verändert; dabei kommen die Elemente, aus denen sich der stereoskopische Glanz zusammensetzt, nicht gleichzeitig, aber schnell hintereinander zur Beobachtung. Ferner erscheinen bewegte Objekte glänzend, wenn die Beleuchtung ihrer einzelnen Teile schnell hintereinander sich verändert, wie es zum Beispiel bei einer bewegten Wasserfläche geschieht. Es genügt selbst, wenn nur die verschiedenartige Beleuchtung der Teile einer Fläche die bekannten Formen der Lichtreflexe unvollkommen spiegelnder Körper nachahmt. Wundt hat monokularen Glanz hervorgebracht,

indem er ein dunkles Quadrat auf andersfarbigem dunklen Grund durch eine unbelegte Glasplatte betrachtete, deren Vorderseite gleichzeitig ein helleres Quadrat auf hellerem Grunde spiegelte, so daß die Spiegelbilder mit dem erstgenannten sich nahehin deckten. Der Glanz verschwand, wenn das gespiegelte Quadrat scheinbar genau an demselben Orte sich befand, wie das wirklich dort vorhandene, dann sah man nur die Mischfarbe. Der Glanz kam aber zum Vorschein, wenn das gespiegelte scheinbar hinter dem wirklichen lag. Lag es vor ihm, so schien eher das gespiegelte zu glänzen. Es wurde hierbei also die Anschauung hervorgebracht, als sähe man hinter und durch das wirklich vorhandene Quadrat noch ein anderes, was dann als ein von ersterem entworfenes Spiegelbild erschien, und das gab den Anschein des Glanzes. Diese Versuche zeigen besonders gut, daß es hier nicht auf besondere Qualitäten der Färbung ankommt, sondern darauf, die Täuschung hervorzubringen, als reflektierte eine gesehene Fläche noch ein anderes Bild.

Der Schein der Durchsichtigkeit tritt auch bei binokularer Deckung zweier verschiedenfarbiger Felder zuweilen ein, worauf Wundt aufmerksam machte. Bringt man zum Beispiel ein helles gelbes und dunkleres blaues Quadrat auf weißem Grunde zu einer unvollständigen binokularen Deckung, so erscheint das Blau da, wo man die Grenze des Gelb und Weiß von ihm gedeckt sieht, durchsichtig. Dagegen fehlt dieser Schein, wo das Gelb die Grenze von Blau und Weiß deckt. Auf schwarzem Grunde erscheint dagegen das Gelb durchsichtig. Das stärker mit dem Grunde kontrastierende Feld erscheint überhaupt der Regel nach als das durchsichtige, entsprechend dem objektiven Verhältnis, wonach etwas, was durch ein durchscheinendes Medium, dessen Substanz selbst deutlich wahrgenommen wird, gesehen wird, immer nur undeutlich gesehen wird, während die Grenzen dieses Mediums, unbedeckt von anderem durchscheinenden, sich der Regel nach scharf markieren werden.

Es sind schließlich noch einige Erscheinungen zu besprechen, welche als Kontrast zwischen den Empfindungen beider Augen auszulegen sind, oder wenigstens ausgelegt werden können.

Zunächst hat namentlich Fechner darauf aufmerksam gemacht, wie außerordentlich gut kleine Unterschiede der augenblicklichen Farbenstimmung beider Augen, d. h. der Weise, in welcher die Augen die Farben empfinden, wahrgenommen werden, wenn man nach einem kleinen hellen Objekte auf schwarzem Grunde sieht und dessen binokulares Bild durch veränderte Augenstellung in Doppelbilder auseinander schiebt. Ist das eine Auge zum Beispiel geschlossen gewesen und hat das andere während der Zeit helle weiße Flächen angesehen, so erscheint unmittelbar hinterher von den zwei Doppelbildern eines weißen Streifens auf schwarzem Grunde dasjenige, welches dem ermüdeten Auge angehört, dunkler und auch violetter als das andere, welches dem vorher ausgeruhten Auge angehört. Hat man dagegen mit dem freien Auge nach einer farbigen Fläche gesehen, so erscheint dessen Bild nachher in der Komplementärfarbe, das andere der induzierenden Farbe gleichfarbig. Hierbei ist die Komplementärfarbe in dem ermüdeten Auge in der Vergleichung der beiden Doppelbilder sehr viel länger sichtbar, als wenn man beide Augen nach derselben farbigen Fläche hat blicken lassen und in beiden daher die gleiche Farbenstimmung nachbleibt. So ist es zum Beispiel ohne dieses Hilfsmittel der Doppelbilder sehr schwer zu erkennen, daß das Nachbild einer mäßig erleuchteten weißen Fläche eine bläuliche Färbung hat, während dieser Umstand in

der Vergleichung mit dem Doppelbilde des ausgeruhten Auges, welches hell orangegelb erscheint, sogleich sichtbar wird. Ist der Unterschied der Helligkeit beider Bilder zu groß, so kann man die Vergleichung sehr erleichtern, wenn man das des freien Auges entsprechend verdunkelt, indem man entweder durch eine feine Öffnung in einem schwarzen Papierblatte blickt, oder durch ein doppelbrechendes Prisma, welches zwei Bilder des hellen Streifens, jedes von halber Helligkeit des direkten Bildes zeigt, oder auch durch ein farbloses graues Brillenglas, von dessen Farblosigkeit man sich vorher überzeugt hat.

Es geht aus diesen Versuchen hervor, daß die Vergleichung zwischen den Farbenempfindungen nahehin korrespondierender Stellen beider Netzhäute mit großer Genauigkeit geschehen kann, scheinbar sogar mit größerer Genauigkeit und viel längere Zeit hindurch, als dies der Fall ist, wenn die beiden Farben durch die entsprechenden Stellen einer Netzhaut verglichen werden sollen. Um nämlich die Farbe, in der die Netzhaut zum Beispiel Weiß empfindet, zu vergleichen mit der, in der es die nicht ermüdete tut, muß man durch starres Fixieren eines weißen Objekts auf schwarzem Grunde ein scharf gezeichnetes Nachbild entwickeln und dies nachher auf gleichmäßig weißem Grunde betrachten. Abgesehen davon, daß die Anstrengung des starren Fixierens ziemlich beträchtlich ist und vielleicht Einfluß auf den Verlauf des Prozesses hat, abgesehen ferner davon, daß man den Vorteil nicht hat, das helle Bild beliebig verdunkeln zu können, so verschwinden die begrenzten Nachbilder auf einer Netzhaut auch bald für die Wahrnehmung, weil wir überhaupt gleichbleibende Helligkeits- oder Farbenunterschiede zwischen zwei verschiedenen Netzhautstellen, die durch Wechsel nicht aufgefrischt werden, schwer bemerken.

Wir haben im § 24 gesehen, daß wir geneigt sind, deutlich wahrnehmbare Unterschiede der Helligkeit und Farbe für größer zu halten, als undeutlich wahrnehmbare, und daß der größere Teil der sogenannten Kontrasterscheinungen hierauf zurückzuführen ist. Eine solche Kontrastwirkung äußert sich nun im vorliegenden Falle dadurch, daß auch das unveränderte Bild sich im Gegensatze zu dem veränderten färbt, erhellt oder verdunkelt. So sieht das reine Weiß des unermüdeten Auges gelb aus, neben dem violetten Grau des durch Weiß ermüdeten, oder ersteres grün, wenn das letztere durch das Nachbild von Grün rosarot gefärbt ist usf.

Statt das eine Doppelbild durch ein Nachbild zu färben, kann man es auch direkt durch ein farbiges Glas färben, welches man vor das betreffende Auge bringt. Aber ich finde auch hier, was wir schon oben für die Kontrasterscheinungen als charakteristisch fanden, daß eine schwache Farbe eine viel deutlichere Kontrastwirkung hervorbringt, als eine sehr gesättigte. Grünliches Fensterglas oder gelbrötliches Bouteillenglas zeigt die komplementäre Farbe auf dem jenseitigen Doppelbilde viel deutlicher, als wenn man durch sehr tief gefärbtes Glas blickt, selbst wenn man im letzteren Falle das Bild des anderen Auges durch passende graue Gläser auf dieselbe Lichtstärke herunterbringt, als das farbige Bild.

Ja es ist sogar ein Kontrast möglich zwischen solchen Farben, die auf korrespondierenden Stellen beider Netzhäute liegen. Man lege einen schwarzen Streifen auf einen weißen Grund, schiebe sein Bild zu Doppelbildern auseinander und bringe dann vor das eine Auge ein blaues, vor das andere ein graues Glas, welche beide ungefähr gleich dunkel sind. Man sieht dann das eine Bild des schwarzen Streifens umgeben von hervortretendem Blau, das andere

von hervortretendem Weiß, während im übrigen Grunde Blau und Weiß mehr oder weniger gleichmäßig übereinander lagern. Dabei zeigt sich das Weiß, was längs der Kontur des schwarzen Streifens hervortritt, entschieden gelblich. Nimmt man beide Gläser fort, so erscheint gelbliches Weiß, wo vorher Blau vorherrschte, und bläuliches Weiß, wo wir es vorher gelblich sahen.

Vertauschen wir bei diesem Versuche die blaue Glasplatte mit einer gelben, so wechselt auch in den Bildern überall Gelb mit Blau.

Es muß wohl als sehr auffallend betrachtet werden, daß unter dem Einfluß der Kontur des Schwarz unsere Aufmerksamkeit sich dem benachbarten Weiß so ausschließlich zuwendet und es von dem im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde überdeckenden Blau so vollständig trennt, daß dieses Weiß sogar gelblich aussehen kann. Dies gelbliche Weiß zeigt übrigens auch darin seinen Charakter als Kontrastfarbe, daß es kurze Zeit stehen bleibt, selbst wenn wir das Auge hinter dem blauen Glase ganz schließen. Auch bei den farbigen Schatten (§ 24) fanden wir, daß das einmal über die Art der Farbe festgestellte Urteil bestehen blieb, selbst nachdem die kontrastierende Farbe, deren Anwesenheit zu dem Irrtume verleitet hatte, aus dem Gesichtsfelde entfernt war.

In den bisherigen Versuchen fand der Kontrast statt in der Vergleichung zweier Farben, welche den entgegengesetzten Gesichtsfeldern angehören. Es kann nun aber auch die Wirkung monokularen Kontrastes durch binokulare Vergleichung mit dem entgegengesetzten Kontraste gesteigert werden. Man lege rechts einen Bogen rosaroten, links einen Bogen grünen Papiers, so daß beide in der Mitte aneinander stoßen; ferner lege man nahe der Grenzlinie auf jede Seite einen Streifen weißen Papiers. Betrachtet man diese beiden Streifen mit freien Augen, so ist in der Regel gar keine Kontrastfärbung an den beiden Papierstreifen zu bemerken, wenn nicht schon starke Nachbilder der beiden Farben entwickelt sind. Blickt man mit einem Auge durch eine schwarze Röhre nach einem dieser Streifen, während das andere Auge geschlossen ist, so bemerkt man allerdings eine schwache komplementäre Kontrastfärbung. Hält man aber zwei schwarze Röhren vor beide Augen, so daß das rechte den einen Streifen mit einem Stück des roten Grundes, das linke den anderen mit einem Stück des grünen Grundes sieht, ohne daß man übrigens die Streifen binokular zum Decken bringt, so treten die komplementären Färbungen der beiden Streifen in einer sonst kaum beobachteten Stärke auf. Die Wirkung nimmt an Stärke immer mehr zu, wenn man den Versuch längere Zeit fortsetzt, ohne den Blick auf einen bestimmten Punkt festzuheften. Dabei entstehen natürlich immer stärkere Nachbilder des Grundes, und da das rechte Auge nur roten, das andere nur grünen Grund sieht, so kann bei allen Bewegungen des Auges sich im rechten Auge immer nur Grün, im linken immer nur Rot als Grund entwickeln und die Kontrastwirkung nur verstärken.

Dies wäre nun ein sukzessiver Kontrast, einer der auf Nachbildern beruht. Wenn man zu Anfang des Versuchs schnell die Augen auf die weißen Streifen hinwendet und sie möglichst schnell in der richtigen Lage fixiert, so sieht man ebenfalls, wenn auch viel schwächer, die Kontrastfarben. Indessen da unter den Umständen dieses Versuchs Nachbilder des Grundes durch die Vergleichung der Färbung in beiden Sehfeldern besonders leicht sichtbar werden, so hielt ich es für nötig, eine Versuchsweise zu suchen, welche ganz sicher vor jeder Entstehung eines Nachbildes des Grundes schützte. Zu dem Ende befestigte ich auf einer Glasplatte zwei Papierstreifen, parallel zueinander in

senkrechter Richtung, von denen der rechte oben schwarz und unten grau, der linke oben grau und unten schwarz war. Die Glastafel brachte ich über eine rechts mit rotem, links mit grünem Papier belegte Fläche, so daß der rechte Papierstreifen über rotem, der linke über grünem Grunde lag. Vor dem Beginn des Versuchs schob ich aber weißes Papier zwischen die Glastafel und die farbige Fläche, so daß die letztere ganz verdeckt war. Nun fixierte ich mit beiden Augen die grauschwarzen Streifen so, daß sie sich deckten, wobei sowohl die obere als untere Hälfte des Bildes aus der Deckung einer schwarzen und einer grauen Streifenhälfte besteht. In der Mitte jedes Streifens hatte ich einen weißen Punkt angebracht als Fixationspunkt. Indem ich die beiden weißen Punkte binokular vereinigte, war ich imstande, das gemeinsame Bild der grauschwarzen Streifen ganz sicher festzuhalten. Wenn ich nun das weiße Papier entfernte, so daß die farbige Fläche dahinter zum Vorschein kam, so entstanden allerdings Spuren einer Kontrastfärbung, die aber außerordentlich schwach waren. Das Grau, welches auf grünem Grunde lag, erschien rötlich, das auf rotem Grunde befindliche grünlich. Dagegen genügten wenige kurze Bewegungen des Blicks von rechts nach links und zurück, um die Kontrastfarben gleich in voller Intensität zum Vorschein zu bringen. Die anfänglichen schwachen Kontrastfärbungen waren schwächer, als sie beim monokularen Kontrast zum Vorschein kommen. Noch schwächer war die Wirkung, wenn das Grau durch Weiß ersetzt wurde.

Die reinen Wirkungen des simultanen Kontrastes auf den beiden grauen Streifen wurden also geschwächt durch die binokulare Vergleichung. Indem das Grau des einen Sehfeldes dem des anderen binokular genähert wurde, wurde eine genauere Vergleichung zwischen den beiden Grau möglich, als vorher im monokularen Felde, wo die beiden Streifen durch weite Strecken Grün und Rot voneinander getrennt waren. In dieser Beziehung verhalten sich also die Erscheinungen des sukzessiven Kontrastes, welche auf einer Veränderung der Empfindung durch Nachbilder beruhen, ganz anders, als die des simultanen Kontrastes, welche wir als Irrtümer des Urteils aufgefaßt haben. Erstere treten durch binokulare Vergleichung auffallender hervor, letztere werden im Gegenteil berichtigt.

Bei der bisher beschriebenen Form des Versuchs wurde eine binokulare Deckung der grauen Streifen mit farbigem Grunde vermieden, sie deckten sich vielmehr mit Schwarz. Nun kann man aber durch veränderte Konvergenz der Augen ihre Bilder so weit aneinander schieben, daß sie sich nicht decken, sondern nur berühren. Bringt man sie in diese scheinbare Lage, während zunächst noch der weiße Bogen darunter liegt, überzeugt sich dabei von dem gleichen Aussehen des Grau an beiden Streifen und nimmt dann das weiße Papier fort, um den farbigen Grund sichtbar zu machen, so erscheint der von Rot umgebene Streifen, der sich binokular mit Grün deckt, entschieden grün, der andere, der von Grün umgeben ist und sich mit Rot deckt, ebenso entschieden rot. Man erhält ganz frappant den Eindruck, als fände eine binokulare Mischung des Grau mit den beiden Farben des Grundes statt. Schiebt man den weißen Bogen wieder unter die Glasplatte, so schwinden augenblicklich die Färbungen, wie es bei einer Mischung der Farben des Grundes mit dem Grau sein müßte.

Aber ein anderer Versuch zeigt, daß wir es hier nicht mit einer Mischung zu tun haben. Schließe ich das rechte Auge, wenn ich die Streifen komple-

mentär gefärbt vor mir sehe, so bleibt nur der von Grün umgebene Streifen sichtbar, und obgleich eine Art roten Schleiers sich von ihm zurückzieht, nämlich das ihn binokular deckende Rot, so bleibt seine Körperfarbe, das Grau, doch so rötlich, als es vorher war; das wäre nicht möglich, wenn das rötliche Aussehen des Grau nur auf einer (binokularen) Mischung mit Rot beruhte. Sowie aus der Mischung das Rot fortfiele, müßte sich die ursprüngliche Farbe herstellen und eher durch den Kontrast grünlich werden. Ich glaube vielmehr, daß der Erfolg dieser Versuche so zu erklären ist: Wir haben vorher gesehen, daß wenn in beiden Sehfeldern Grau enthalten ist und sich beides binokular mit Schwarz deckt, wir den Farbenton der beiden Grau sehr genau vergleichen können, und daß durch diese unmittelbare Vergleichung der beiden Grau Wirkungen monokularen Kontrastes, die uns geneigt machen könnten, die beiden Grau für verschiedenartig zu halten, geschwächt werden. In dem letztbeschriebenen Versuche dagegen deckt sich Grau, welches von Rot umgeben ist, und welches wir deshalb geneigt sind, für grünlich zu halten, binokular mit Grün, und das andere durch Kontrast mit der grünen Umgebung rötlich gefärbte Grau deckt sich binokular mit Rot. Hier kann diese binokulare Deckung der beiden Flächen, welche zu vergleichen sind mit zwei verschiedenen und lebhaften Farben die Vergleichung sehr unsicher machen und daher den Kontrast verstärken.

Schiebt man nachher eine weiße Fläche unter, an der die Augen ihr Urteil über das Weiß wieder berichtigen können, so schwindet augenblicklich der Kontrast. Auch wenn eine schwarze untergeschoben wird, so ist sogleich eine genaue und ungefälschte Vergleichung der beiden grauen Streifen möglich, welche den Kontrast derselben schwinden macht. Wenn man dagegen nur ein Auge schließt, so treten keine Momente ein, die das Urteil berichtigen könnten, und der Kontrast bleibt bestehen.

Wir können das Resultat der bisher beschriebenen Versuche dahin zusammenfassen: Wenn im binokularen Felde das rechte Auge das Bild α, das linke das Bild β dicht nebeneinander erblickt und α sich mit dem Grunde b, β mit dem Grunde a deckt, so ist die Vergleichung der objektiven oder durch Nachbilder veränderten Färbung von α und β sehr genau, so oft der Grund a dieselbe Färbung wie b hat; sie ist dagegen sehr unsicher, so oft a und b verschiedene Farbe oder Beleuchtung haben. Ersteres zerstört monokulare Simultankontraste, letzteres begünstigt sie.

Bei einigen anderen Versuchen über binokularen Kontrast kommt, wie bei vielen des monokularen Kontrastes, in Betracht, daß wir die objektiven Farben der Körper von der Farbe einer weit verbreiteten Beleuchtung zu trennen geübt sind.

Dahin gehört zunächst Fechners[1] sogenannter paradoxer Versuch. Man blicke nach einer weißen Fläche, schließe und öffne abwechselnd das rechte Auge, so wird man finden, daß im Moment des Schlusses die weiße Fläche, welche nun nur noch vom linken Auge gesehen wird, ein wenig dunkler erscheint, als während der Öffnung beider Augen. Der Ausschluß des Lichtes von dem einen Auge bringt also, wie man erwarten mußte, eine Verdunkelung des Bildes hervor, freilich eine verhältnismäßig außerordentlich schwache, für manche Augen kaum wahrnehmbare. Nun ändere man die Bedingungen des

[1] Abhandl. der Sächs. Ges. d. Wiss. VII (1860), 416—463.

Versuchs dadurch ab, daß man vor das rechte Auge ein ziemlich stark verdunkelndes graues Glas nimmt. Wenn man jetzt das rechte Auge öffnet, erscheint die weiße Fläche im Gegenteil dunkler; wenn man es schließt, heller. Also wenn mehr Licht in die Augen fällt, haben wir scheinbare Verdunkelung, wenn weniger, Erhellung. Nimmt man immer hellere graue Gläser, so schwindet dieser negative Erfolg und geht endlich in den positiven über, den die freien Augen zeigen, nämlich Öffnung des geschlossenen Auges gibt Erhellung. Geht man im Gegenteil zu sehr dunkeln Gläsern über, so kommt man zuletzt an eine Grenze, wo es einerlei bleibt, ob das Auge hinter dem Glase offen oder geschlossen ist, indem das einfallende Licht keine in Betracht kommende Wirkung mehr ausübt. Eine mittlere Verdunkelung der Gläser gibt also ein Maximum des Erfolgs. Fechner selbst brauchte dazu Gläser, die zwischen 0,03 und 0,05 des einfallenden Lichts durchließen. Statt der grauen Gläser kann sehr zweckmäßig Auberts Episkotister* angewendet werden.

Daß die Bewegung der Pupille hierbei ohne Einfluß ist, wurde kontrolliert, indem der Beobachter mit dem freien Auge durch eine enge Öffnung von geringerem Durchmesser als die Pupille blickte. Man kann auch überhaupt bei diesen Versuchen enge Öffnungen in schwarzen Papierblättchen, statt der dunklen Gläser, zur Verdunkelung des Bildes anwenden.

Der Erfolg dieses paradoxen Versuchs könnte so ausgelegt werden, als wenn die Lichtempfindung in dem einen Auge unter Umständen die im anderen Auge herabsetzte, als wenn also ein antagonistisches Verhältnis zwischen beiden Netzhäuten bestände; aber eine leichte Modifikation des Versuchs beweist, wie ich gefunden habe, daß es sich hier um ganz etwas anderes handelt.

Man stelle sich so auf, daß man vor sich im Gesichtsfelde einen wohl begrenzten und konturierten weißen Gegenstand hat, z. B. eine weiße, den Fenstern gegenüber gelegene Tür, und wähle ein dunkles Glas, mit dem der paradoxe Versuch gut gelingt, wenn man nach dieser Tür hinblickt. Dann schiebe man zwischen die Tür und das von dem dunklen Glase bedeckte Auge nahe vor diesem ein weißes Blatt Papier so ein, daß es diesem Auge die Tür verdeckt und das ganze Gesichtsfeld dieses Auges einnimmt. Indem man das Blatt mehr oder weniger schräg gegen das Licht wendet, wird man ihm leicht eine solche Beleuchtung geben können, bei der es ebenso hell ist, wie die dahinter liegende Tür. Jetzt wiederhole man den Versuch, er wird den umgekehrten Erfolg geben, wie vorher. Öffnung des geschlossenen Auges hinter dem dunklen Glase und dem Papier läßt die Tür ganz wenig hell werden, indem sich eine Art lichten Nebels über sie ergießt: das ist nämlich das binokular deckende Bild des weißen Papiers. Nachdem man dies konstatiert hat, ziehe man nun das weiße Blatt fort, während beide Augen geöffnet sind, so daß man mit beiden Augen die Tür sieht. Jetzt erscheint die Tür beträchtlich

* Nachtrag von Helmholtz in der ersten Auflage (S. 856). Der Episkotister besteht aus zwei aneinander gelegten, geschwärzten Messingscheiben, in deren jeder vier Sektoren von je 45° ausgeschnitten sind, und die sich gegeneinander so verschieben lassen, daß vier Spalten übrig bleiben, deren Breite von 0° bis 45° beliebig verändert werden kann. Werden dieselben in schnelle Rotation versetzt, so erhalten sie das Ansehen und die Wirkung eines grauen Glases von einem leicht und genau zu berechnenden Grade der Lichtschwächung. Das Instrument ist von Aubert beschrieben in seiner Physiologie der Netzhaut S. 30, 34, 283; ein ähnliches hatte auch schon Talbot konstruiert. Poggendorffs Annalen. 1835. XXXV, 459.

verdunkelt, obgleich die Helligkeit jener Stellen der beiden Sehfelder, in denen sie erscheint, ganz unverändert geblieben ist.[1]

Diese Änderung des Versuchs zeigt, daß es sich hierbei nicht um eine Änderung in der Empfindung des Lichts, sondern nur um eine Änderung unseres Urteils über die Körperfarbe des weißen Objekts handelt. Ist das eine Gesichtsfeld ausgefüllt mit Dunkel (bei geschlossenem Auge) oder mit gleichmäßig verteiltem schwachen Lichte Bild des weißen Papiers durch das dunkle Glas gesehen), so rechnen wir diese gleichmäßig und weit über die Grenzen des der Tür entsprechenden Gesichtsfeldes ausgedehnte Beleuchtung nicht der Körperfarbe der Tür zu, sondern bilden uns unser Urteil über diese Farbe ganz allein nach der Aussage desjenigen Auges, welches die Umrisse der Tür erkennt. Höchstens erscheinen die Abänderungen der Beleuchtung im anderen Auge als ein dunkler oder heller Nebel, der sich vor die Tür und die übrigen Gegenstände hinlegt. Wenn wir aber mit dem verdunkelten Auge ebenfalls die Umrisse der Tür erkennen und diese in dunklem Grau erblicken, so erscheint uns dieses Grau der Körperfarbe der Tür ebenso angehörig, wie das Weiß des entgegengesetzten Auges, und die Tür selbst erscheint uns deshalb verdunkelt. Sie erscheint dann wie ein grauer, mit weißem Licht erhellter und glänzender Körper. Natürlich aber muß diese Verdunkelung ausbleiben, wenn entweder die Verdunkelung durch das Glas sehr gering ist und sich daher das im zweiten Auge hinzukommende Licht nur als Licht merklich macht, oder wenn im Gegenteil die Verdunkelung so groß ist, daß die Objekte kaum noch erkannt werden können.*

Ähnliche Verhältnisse kommen auch monokular vor bei dem von Smith und Brücke[2] angegebenen Versuche, den Fechner den seitlichen Fensterversuch nennt. Man kann diesem Versuche eine andere Form geben, wie ich gefunden habe, bei der sich die Bedingungen des Erfolges noch sicherer übersehen lassen, als bei jener ersten Form. Ich habe eine planparallele Platte Uranglas in zwei Hälften teilen lassen. Dieses Glas sieht im Kerzenlicht ganz ungefärbt aus, weil es nur die violetten und einen Teil der blauen Strahlen absorbiert, deren Menge im Kerzenlicht sehr unbedeutend ist; bei Tage, wenn die Substanz des Glases selbst nicht stark erleuchtet ist, erscheinen weiße Gegenstände durch das Glas schwach gelblich. Wird die Masse des Glases selbst aber durch direktes Sonnenlicht getroffen, so geht intensiv grünes Fluoreszenzlicht von allen seinen Teilen aus. Wenn ich vor jedes Auge eine solche Platte Uranglas nehme, beide so beschattet, daß nur das von dem Objekte kommende Licht sie trifft, und das Bild eines weißen Feldes auf schwarzem Grunde in ein Doppelbild auseinander treibe, so erscheinen natürlich beide Bilder des weißen Feldes in gleicher gelblich weißer Farbe. Wenn ich nun aber das eine Glasstück von direkten Sonnenstrahlen treffen lasse, so füllt sich das Sehfeld des dahinter stehenden Auges mit dem grünen Lichte der Fluoreszenz, und nun sieht nach wenigen Bewegungen des Auges das zugehörige Doppelbild des Weiß, welches noch dazu mit grünem Lichte übergossen ist, rosarot aus, während

[1] Daß es bei diesem Versuch darauf ankommt, ob man begrenzte oder unbegrenzte Flächen mit dem verdunkelten Auge sieht, hat auch Herr Hering beobachtet. (Beiträge zur Physiologie. S. 311—312.)

[2] S. oben § 24.

* Vgl. Anm. 2 am Schlusse des Paragraphen. K.

das Doppelbild des anderen Auges heller und grünlich erscheint, obgleich es objektiv rein weiß ist. Wir haben also hier in dem Auge, welches durch das fluoreszierende Glas sieht und dessen Grund deshalb gleichmäßig mit schwachem grünen Lichte bestrahlt wird, eine so vollständige Trennung des begrenzten Weiß von dem unbegrenzt ausgegossenen Grün, daß an jenem Weiß sogar die rosenrote Färbung zum Vorschein kommt, welche durch die Ermüdung des Auges gegen Grün bedingt wird. Im Kontrast dazu erscheint dann das andere nicht grüne Bild grünlich.

Bei dem ursprünglichen Versuche von Smith war es, wie wir oben gesehen haben, das rote durch die Augenhäute eingedrungene Licht, welches das gleichseitige Bild dunkler und blaugrün, das andere rot erscheinen läßt. Dieses rote Licht kann sichtbar gemacht werden, wenn man mit dem seitlich beleuchteten Auge schwarze Buchstaben auf weißem Grunde betrachtet; diese sehen hierbei oft leuchtend rot aus. Natürlich erscheint dann auch das dem seitlich beleuchteten Auge angehörige Halbbild eines in Doppelbilder auseinander geschobenen schwarzen Flecks auf weißem Grund rötlich in Vergleich mit dem des anderen Auges. Konzentriert man dagegen durch eine Linse grünes oder blaues Licht auf einen Punkt der Sklerotika, so ist das weiße Bild in diesem Auge rosenrot oder gelb. Da die Erklärung dieses Versuches bezweifelt worden ist[1], so ist die Modifikation desselben mit den Uranglasplatten, wobei alle konkurrierenden Umstände deutlicher zu übersehen sind, wohl überzeugender.

Die Erscheinungen des binokularen Kontrastes erklären sich also von dem von uns eingehaltenen Standpunkte leicht. Faßt man dagegen, wie es früher meist geschah, die Kontrastfarben als Veränderungen der Empfindung auf, welche durch die Reizung einer Netzhautstelle in den benachbarten hervorgerufen werden, so folgt auch für den binokularen Kontrast mit Notwendigkeit, daß er durch Einwirkung der Empfindungen der einen Netzhaut auf die der anderen entstehe, und man hat deshalb hierin mit einen Grund für die angeborene anatomische Verbindung korrespondiernder Nervenfasern gesucht.*

Es ist hier noch die von Dove, dem Entdecker des stereoskopischen Glanzes, aufgestellte Erklärung dieser Erscheinung zu erwähnen. Dove unterscheidet an glänzenden Körpern das von der Oberfläche reflektierte weiße und das aus den oberflächlichen Schichten der Substanz hervordringende gefärbte Licht. Glanz entsteht nach ihm dadurch, daß man die beleuchtete Körpersubstanz hinter der beleuchteten Oberfläche sehe, also zwei Arten von Licht, das eine durch das andere durchscheinend. Er glaubt nun, daß, wenn wir zwei Farben, z. B. Rot im einen, Blau im anderen Felde kombinieren, wir auf verschiedene Entfernung derselben vom Auge schließen, weil wir verschiedene Akkommodation anwenden müssen, um sie scharf zu sehen. Ich habe diese Erklärung nicht beibehalten, weil die seit Aufstellung derselben angestellten Versuche über Beurteilung der Entfernung mittels der Akkommodation, namentlich in einem Falle, wo, wie hier die Konvergenz der Augen konstant erhalten werden muß, es mir höchst unwahrscheinlich machen, daß eine solche Wahrnehmung scheinbar verschiedener Entfernung der Farben möglich sei. Außer-

---

[1] Fechner über den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Berichte der Königl. Sächsischen Ges. d. Wiss. 1861. S. 27—56.

---

* S. Anm. 3. am Schlusse des Paragraphen. K.

dem tritt die Schwierigkeit ein, daß Weiß und Schwarz zusammen kombiniert auch Glanz geben. Hierbei glaubt Dove nun annehmen zu dürfen, daß, weil Weiß die Pupille zusammenziehen macht, was ebenfalls bei stärkerer Akkommodationsanstrengung geschieht, Schwarz sie aber erweitert, die Betrachtung von Weiß und Schwarz verschiedene Akkommodationsgefühle gebe. Dagegen ist zu bemerken, daß bei den vorliegenden Versuchen gleichzeitig ein Auge Weiß, das andere Schwarz sieht und beide Pupillen dabei dieselbe mittlere Weite einnehmen, zweitens, daß alle Akkommodation sich nicht auf die Mitte einer gleichfarbigen Fläche, sondern nur auf ihre Konture beziehen kann, und nicht einzusehen ist, wie daraus ein Unterschied des Akkommodationsgefühls entstehen könne, daß im einen Bilde Weiß rechts, Schwarz links von der Grenze, oder Weiß über, Schwarz unter der Grenze liegt, im anderen umgekehrt. Ich habe deshalb die oben gegebene Erklärung als die einfachere der ursprünglichen des berühmten Entdeckers dieser Erscheinung zu substituieren mir erlaubt.

Geschichte. Der Wettstreit der Sehfelder erregte schon früh die Aufmerksamkeit der Beobachter. Du Tour benutzte ihn schon, um seine Meinung, daß der Regel nach nur ein Auge auf einmal sehe, und wir deshalb die Objekte einfach sähen, trotz der Anwesenheit zweier Augen, zu unterstützen. Haldat wollte dagegen Mischung der Farben gesehen haben, was er mit der von Newton und später von Wollaston und J. Müller angenommenen Hypothese von der anatomischen Vereinigung korrespondierender Sehnervenfasern in Zusammenhang brachte. Ihm schlossen sich an Mönnich, Janin, Walther. Dagegen J. Müller selbst, der die Lehre der Identität der Netzhautstellen und ihrer Konsequenzen hauptsächlich ausgebildet hat und der gewiß am meisten dabei interessiert gewesen wäre, eine binokulare Farbenmischung zu sehen, keine solche erwähnt, sondern nur den Wettstreit gesehen hat. Wie auch die späteren Beobachter verschieden geurteilt haben, ist oben schon erwähnt. Es scheinen in dieser Beziehung sehr große individuelle Unterschiede zu bestehen. Solange man die Empfindung einer Mischfarbe als eine einfache Wirkung zweier kombinierter Ursachen ansah, schien eine solche Empfindung nur in einer und derselben Nervenfaser zustande kommen zu können, und die Beobachtung wirklicher binokularer Farbenmischung schien deshalb den Beweis der anatomischen Verschmelzung je zweier korrespondierender Fasern liefern zu können, und mußte andererseits bei Annahme einer solchen Hypothese auch notwendig erwartet werden. Der Youngschen Farbentheorie gegenüber verliert freilich dieser Punkt sehr an Wichtigkeit, wie schon oben hervorgehoben ist.

Ein wesentlicher Fortschritt war die Entdeckung der objektiven Bedeutung der binokularen Vereinigung verschiedener Farben oder Helligkeiten in dem Phänomen des stereoskopischen Glanzes durch Dove. Der oben besprochenen Theorie dieses Phänomens, der sich auch Brewster anschloß (dabei, wie es scheint durch ein Mißverständnis, Doves eigene Theorie bekämpfend), stellte später zuerst J. J. Oppel die oben vorgetragene einfachere entgegen. Ohne von diesem zu wissen kam ich selbst auf dieselbe Ansicht der Sache und hob die Wichtigkeit des Phänomens für die Theorie der Empfindungen korrespondierender Stellen hervor.

Die Phänomene des binokularen Kontrastes wurden erst in den letzten Jahren studiert, namentlich durch Fechner in einer sehr ausgedehnten Arbeit; einzelne dahin gehörige Beobachtungen waren schon früher von E. Brücke, H. Meyer, Panum gemacht worden.

1743. du Tour, *Mém de Paris.* 1743. p. 334.
1760. Derselbe, *Pourquoi un objet sur lequel nous fixons les yeux paroit-il unique? Mém. des savans étr.* III.

1772. Janin, *Mémoires et observations sur l'oeil. Lyon et Paris.* S. 39. Deutsch: Abhandl. über das Auge und seine Krankheiten. Berlin 1776. S. 38.

1784. J. Elliot, Anfangsgründe derjenigen Teile der Naturlehre, welche mit der Arzneiwissenschaft in Verbindung stehen. Übersetzt von Bertram. Leipzig 1784.

1791. W. C. Wells, *Essay upon single vision with two eyes.* London.

— Mönnich, Untersuchung der Frage, ob man mit beiden Augen zugleich und gleich deutlich sehe. Deutsche Abhandl. d. Berl. Akad. 1790—91. S. 46.

1793. Walther, Von der Einsaugung und Durchkreuzung der Sehnerven. Berlin 1794. Deutsche Abhandl. d. Berl. Akad. 1793. S. 3.

1799. L. A. v. Arnim, Über scheinbare Verdoppelung der Gegenstände für das Auge. Gilbert's Ann. III, p. 256.

1806. Ch. N. A. Haldat du Lys, *Sur la double vision. Journ. de physique.* LXIII, p. 387.

1814. Ackermann und Herholt, Sieht der Mensch mit einem Auge allein oder mit beiden zugleich. Kopenhagen.

1826. J. Müller, Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 191—194.

1836. A. W. Volkmann, Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichts. Leipzig. S. 97—99.

1838. Wheatstone, *Contributions to the physiology of vision. Phil. Trans.* 1838. II, p. 386—387.

— Völckers in J. Müllers Archiv für Anat. u. Phys. 1838. S. 61. u. 63.

1841. Dove in Monatsber. d. Berl. Akad. 1841. S. 251.

1846. A. Seebeck, Beiträge zur Physiologie des Gehör- und Gesichtssinns. Poggendorffs Ann. LXVIII, 449.

1848. E. Harless, Physiologische Beobachtung und Experiment. Nürnberg. 1848. S. 45.

1849. Foucault et Regnault, *Note sur quelques phénomènes de la vision au moyen des deux yeux. C. R.* XXVIII, 78. *Phil. Mag.* XXXIV, 269. *Inst.* XVII, Nr. 783.

— de Haldat, *Optique oculaire. Nancy. — Arch. des sc. phys. et nat.* XII, 45. *Inst.* XVII, Nr. 786. p. 29.

1850. H. W. Dove, Über die Ursache des Glanzes und der Irradiation, abgeleitet aus chromatischen Versuchen mit dem Stereoskop. Poggendorffs Ann. LXXXIII, 169. Berl. Monatsber. 1851. S. 252. *Phil. Mag.* (4) IV, 241. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XXI, 209. *Inst.* Nr. 991. p. 421.

Derselbe, Über das Binokularsehen prismatischer Farben und eine neue stereoskopische Methode. Poggendorffs Ann. LXXX, 446. Berl. Monatsb. 1850. S. 152. *Arch. des sc. phys. et natur.* XIX, 219.

— H. Meyer, Über einen optischen Versuch. Wiener Ber. VII, 454. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XIX, 138.

1852. D. Brewster, *Examination of Doves theory of lustre. Athen.* 1852. p. 1041. *Cosmos.* I, 577—578. *Silliman J.* (2) XV, 125.

— H. Welker, Über Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen. S. 107.

1853. E. Brücke, Über die Wirkung komplementär gefärbter Gläser beim binokulären Sehen. Wiener Ber. XI, 213—216. Poggendorffs Ann. XC, 606—609.

1854. F. Burckhardt, Über Bionkularsehen. Verhdl. d. naturforsch. Ges. in Basel. I, 123—154.

— J. J. Oppel, Über die Entstehung des Glanzes bei zweifarbigen, insbesondere bei schwarzen und weißen stereoskopischen Bildern. Jahresber. d. Frankf. Vereins 1853—54. S. 52—55, 1854—55. S. 33—37.

— F. Burckhardt, Zur Irradiation. Verh. d. naturf. Ges. in Basel. I, 154—157.

1855. D. Brewster, *On the binocular rision of surfaces of different colours. Athen.* 1855. p. 1120. *Inst.* 1855. p. 375. *Rep. of Brit. Assoc.* 1855. 2, p. 9.

— W. Dove, Über die von ihm gegebene Erklärung des Glanzes. Berl. Monatsber. 1855. S. 691—694. *Inst.* 1856. p. 118—119.

1856. H. Helmholtz, Über die Erklärung der steroskopischen Erscheinungen des Glanzes. Verhandl. d. naturhist. Vereins d. Rheinlande. S. XXXVIII—XL.

— H. Meyer, Über den Einfluß der Aufmerksamkeit auf die Bildung des Gesichtsfeldes überhaupt und die Bildung des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes beider Augen im besondern. Archiv für Ophthalmologie II, 2, S. 77—92.

1857. Dove, Über Binokularsehen durch verschieden gefärbte Gläser. Berl. Monatsber. 1857. S. 208—211. Poggendorffs Ann. CI, 147—151.

1857. Paalzow, Über subjektive Farben und die Entstehung des Glanzes. Berl. Monatsber 1857. S. 435.
1858. J. Dingle, *On a new law of binocular vision. Athen.* 1858. II, 458.
— J. J. Oppel, Über das „Glitzern", eine eigentümliche Art des Glanzes und die stereoskopische Nachahmung desselben. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1856—57. S. 56—62.
— P. L. Panum, Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen Kiel. S. 38—42
1860. Th. Fechner, Über einige Verhältnisse des binokularen Sehens. Berichte d. sächs. Ges. d. Wiss. VII, 337—564.
— F. Zöllner, Über eine neue Beziehung der Retina zu den Bewegungen der Iris. Poggendorffs Ann. CXI, 481—499; 660.
— H. W. Dove, Optische Notizen. Poggendorffs Ann. CX, 286—288.
1861. E. Brücke, Über den Metallglanz. Wiener. Ber. XLIII, 2. p. 177—192.
— D. Brewster, *On binocular lustre. Athen.* 1861. (2) p. 411. *Rep. of Brit. Assoc.* 1861. 2, p. 29—31.
— O. N. Rood, *Upon some experiments connected with* Doves *theory of lustre. Silliman J.* (2) XXXI, p. 339—345. *Phil, Mag.* (4) XXII, 38—45.
— H. W. Dove, Über den Glanz. Berl. Monatsber. 1861. S. 522—525. Poggendorffs Ann. CXIV, 165—168.
— P. L. Panum, Über die einheitliche Verschmelzung verschiedenartiger Netzhauteindrücke beim Sehen mit zwei Augen. Reicherts und Du Bois' Archiv für Anat. u. Physiol. 63—227.
1862. W. Wundt, Über die Entstehung des Glanzes. Poggendorffs Ann. CXVI, 627 bis 631.
— O. N. Rood, *On some stereoscopic experiments. Silliman J.* (2) XXXIV, 199—202.
— G. Th. Fechner, Über den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Leipz. Ber. 1862. S. 27—56.
— W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg. S. 299—375.
1864. E. Hering, Beiträge zur Physiologie 5. Heft. Leipzig. p. 312—316.
1865. E. Javal, *De la neutralisation dans l'acte de la vision. Ann. d'oculistique.* LIV. p. 5—16.

Zusätze von v. Kries.

1. Als besonders geeignet für die Erzielung einer binokularen Farbenmischung haben Schenck[1] und Stirling[2] empfohlen, mit dem rechten und linken Auge zwei Gegenstände von verschiedener Farbe, aber von gleicher und einigermaßen verwickelter Form zu betrachten, z. B. Briefmarken, die bekanntermaßen vielfach in genau gleicher Prägung bei ungleicher Farbe hergestellt werden. Die genaue Übereinstimmung der Form begünstigt offenbar die stereoskopische Vereinigung und mit ihr zusammen auch die binokulare Farbenmischung. Wie Schenck mitteilt, gelingt auf diese Weise die Wahrnehmung einer Mischfarbe auch Personen, die eine solche sonst durchaus nicht erhalten können. Ich kann dies für mich bestätigen. Ich habe schon vor langer Zeit nach vielen vergeblichen Bemühungen die mich dem ganzen Phänomen gegenüber sehr skeptisch gemacht hatten) durch ein dem Schenckschen ganz ähnliches Verfahren (ich benutzte damals angetuschte Münzen) eine binokulare Farbenmischung in durchaus überzeugender Weise erhalten. Bei diesem Verfahren (es gelingt mir am besten mit gekreuzten Blicklinien) sehe ich eine vollkommen ruhige und gleichmäßige Mischfarbe. Habe ich das Mischbild einige Zeit gesehen, und verdecke dann das eine Auge, halte aber das andere auf das auch vorher von

[1] Schenck, Sitzungsber. der phys.-med. Gesellsch. zu Würzburg 1898.

[2] Stirling, An experiment on binocular vision with halfpenny postage stamps. Journal of physiology 27. XXIII. 1901.

ihm fixierte Objekt gerichtet, so überzeuge ich mich leicht, daß die Farbe des Mischbildes von derjenigen sehr verschieden ist, die bei einäugigem Sehen lediglich zufolge der längeren Fixation und Umstimmung entstanden ist.

Die Möglichkeit einer binokularen Farbenmischung muß ich daher auch für mich, wiewohl ich sie nur unter ganz besonderen Umständen erzielen kann, behaupten; und ganz im allgemeinen muß ihr Vorkommen, wie ich glaube, unbedingt anerkannt werden. Geht man hiervon aus, so wird man wohl, ohne die Bedeutung der von HELMHOLTZ zusammengestellten Täuschungsmöglichkeiten zu bestreiten, doch zu der Vermutung gelangen, daß andere Personen die Erscheinung viel leichter erhalten können, und daß die Unterschiede der Angaben in erster Linie auf tatsächlich vorhandene individuelle Unterschiede zurückzuführen sind.

2. Der FECHNERsche paradoxe Versuch ist später von SCHÖN und MOSSO[1] wiederholt und in einigen Richtungen des Genaueren verfolgt worden. Eine von ihnen gefundene neue Erscheinung besteht in einem periodischen Schwanken der Wettstreits- resp. Mischungsverhältnisse, derart, daß eine mit einem Auge betrachtete helle Fläche bei Verdeckung des anderen sich abwechselnd zu erhellen und wieder zu verdunkeln schien.

Übrigens gehören hierher auch die Beobachtungen PIPERS[2], nach denen die Verhältnisse der empfundenen Helligkeit bei monokularem und binokularem Sehen beim Dämmerungssehen andere sind, als beim Tagessehen. Im ersteren Falle (schwaches Licht, dunkeladaptiertes Auge) ist die Helligkeit bei binokularer Betrachtung beträchtlich größer, entsprechend auch die Schwellenwerte etwa nur halb so groß wie bei einäugiger Beobachtung.

Als eine besondere Form des Wettstreits ist hier auch diejenige noch zu erwähnen, die man erhält, wenn man durch Belichtung nur eines Auges Nachbilder erzeugt und die Erscheinung derselben beobachtet, wenn dieses Auge geschlossen und das andere geöffnet ist. In dieser Richtung sind namentlich von BOCCI[3] Beobachtungen angestellt worden, die lehren, daß unter solchen Umständen das Nachbild sehr häufig sichtbar ist, d. h. also kombinierte Eindrücke entstehen, an denen einerseits das Nachbild des geschlossenen Auges, andererseits die durch das sehende Auge vermittelten Empfindungen Anteil haben. Eine Auskunft über den (retinalen oder zerebralen) Sitz der Nachbilder läßt sich selbstverständlich den Beobachtungen nicht entnehmen.

3. Es ist hier der Ort, noch eine weitere Beobachtung anzuführen, die sich auf das Verhältnis des rechten und linken Auges resp. ihrer zentralen Repräsentationen beziehen. SHERRINGTON[4] prüfte die Frequenz, die ein Lichtwechsel haben muß, um die Empfindung zu einer stetigen zu machen (das Flimmern zum Verschwinden zu bringen) und veränderte dabei in mannigfacher Weise die Phasenverhältnisse der rechts- und linksäugigen Belichtung.

Es zeigte sich dabei, daß es hier wesentlich darauf ankommt, wie die Verhältnisse für jedes einzelne Auge gestaltet werden, so daß mit Bezug auf die Verschmelzung resp. zeitliche Unterscheidung jedes Auge unabhängig für sich zu funktionieren scheint. K.

[1] SCHÖN und MOSSO, Eine Beobachtung über den Wettstreit der Sehfelder. Archiv f. Ophth. XX. 2. S. 289. 1874.

[2] PIPER, Zeitschrift f. Psychologie usw. 31. S. 161. 32. S. 161. 1903.

[3] BOCCI, Annali di ottalm. XXV. S. 445. 1896.

[4] SHERRINGTON, On binocular flicker and the correlation of activity of corresponding retinal points. British journal of psychology. I. S. 26. 1905.

§ 33. Kritik der Theorien.

Nachdem ich die Übersicht der Tatsachen, die sich bei der Untersuchung der Gesichtswahrnehmungen ergeben, beendigt habe, wird es nützlich sein, noch einmal einen Rückblick auf den Zusammenhang der theoretischen Vorstellungen zu werfen und zu prüfen, welche den Tatsachen gegenüber als zulässig, welche als unzulässig oder unwahrscheinlich erscheinen.

Es ist dabei von vornherein zu bemerken, daß unsere Kenntnis der hierher gehörigen Erscheinungen noch nicht so vollständig ist, um nur eine Theorie zu erlauben und jede andere auszuschließen. Bei der Wahl zwischen den verschiedenen theoretischen Ansichten scheint mir unter diesen Umständen bisher mehr eine Neigung zu gewissen metaphysischen Betrachtungsweisen, als der Zwang der Tatsachen, ihren Einfluß auf die verschiedenen Forscher ausgeübt zu haben, namentlich da in dem psychologischen Gebiete noch prinzipielle Fragen hinzukommen, die in dem Bereiche der unorganischen Naturerscheinungen längst vollständig beseitigt sind.

Manche Naturforscher sind in der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen, wie mir scheint, allzu bereit gewesen, allerlei anatomische Strukturen zu supponieren oder auch neue Qualitäten der Nervensubstanz vorauszusetzen, welche nicht die geringste Ähnlichkeit mit dem haben, was wir sonst von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Naturkörper im allgemeinen oder den Nerven im besonderen bestimmt wissen, Strukturen und Eigenschaften, welche nur dazu dienen, für ein oder einige wenige Phänomene des Sehens Erklärungen herzustellen, die wenigstens den äußeren Anschein naturwissenschaftlicher Erklärungen haben sollten, und bei denen die ganz unzweifelhafte Einmischung psychischer Phänomene entweder ganz geleugnet oder als relativ unwichtig hingestellt wurde.

Ich gebe zu, daß wir noch weit entfernt von einem naturwissenschaftlichen Verständnis der psychischen Erscheinungen sind. Die Möglichkeit eines solchen Verständnisses entweder absolut zu leugnen, wie die Spiritualisten, oder andererseits absolut zu behaupten, wie die Materialisten, dazu kann wohl die Neigung zu dieser oder jener Richtung der Spekulation treiben; dem Naturforscher, der sich an die faktischen Verhältnisse zu halten und deren Gesetze zu suchen hat, ist dies eine Frage, für welche er keine Entscheidungsgründe besitzt. Man muß nicht vergessen, daß der Materialismus ebensogut eine metaphysische Spekulation oder Hypothese ist, wie der Spiritualismus, und ihm deshalb nicht das Recht einräumen, in der Naturwissenschaft über faktische Verhältnisse ohne faktische Grundlage entscheiden zu wollen.

Welche Ansicht man aber auch von den psychischen Tätigkeiten haben und welche Schwierigkeit ihre Erklärung auch bieten mag, so sind sie jedenfalls faktisch vorhanden und ihre Gesetze sind uns bis zu einer gewissen Grenze wohlbekannt aus der täglichen Erfahrung. Ich für mein Teil halte es für sicherer, die Erklärung der Erscheinungen des Sehens anzuknüpfen an andere, freilich selbst noch weitere Erklärung bedürftige, aber doch jedenfalls vorhandene und tatsächlich wirksame Vorgänge, wie es die einfacheren psychischen Tätigkeiten sind, als sie auf ganz unbekannte, nur ad hoc erfundene, durch keinerlei Analogie gestützte Hypothesen über die Einrichtung des Nervensystems und die Eigenschaften der Nervensubstanz zu gründen. Zu dem letzteren Schritte würde

ich mich erst berechtigt glauben, wenn alle Versuche der Erklärung aus bekannten Verhältnissen gescheitert sein sollten.

Das letztere ist nun meines Erachtens aber bei der psychologischen Erklärung der Gesichtswahrnehmung keineswegs der Fall; im Gegenteil, je aufmerksamer ich die Erscheinungen studiert habe, desto gleichmäßiger und übereinstimmender hat sich überall die Einwirkung der psychischen Vorgänge gezeigt, und desto konsequenter und zusammenhängender stellte sich mir dieses ganze Gebiet von Erscheinungen dar.

Ich habe deshalb keinen Anstand genommen, in den vorausgehenden Paragraphen die Tatsachen durch Erklärungen, die wesentlich auf die einfacheren psychischen Vorgänge der Ideenassoziation gestützt sind, in Verbindung und in Zusammenhang zu setzen. Daß eine solche Ansicht nicht neu ist, habe ich in den geschichtlichen Übersichten schon erwähnt. Wenn in der jüngsten Zeit die Ansichten einzelner Physiker und Physiologen, die diese Richtung einschlugen, wie Wheatstone, Volkmann, H. Meyer, Nagel, Classen, Wundt, mehr Opposition als Anerkennung fanden, so glaube ich, daß dies, abgesehen von der Abneigung unseres Zeitalters gegen philosophische und psychologische Untersuchungen, davon herrührt, daß es an einer zusammenhängenden Darstellung aller Erscheinungen dieses Gebiets fehlte, und deshalb von seiten der unerledigten Erscheinungsgebiete immer wieder Zweifel aufstiegen gegen diejenigen, welche von den genannten Forschern bearbeitet waren. Ich habe deshalb die vorliegende Gelegenheit benutzt, um das ganze Gebiet nach dieser Richtung hin durchzuarbeiten und eine Übersicht davon zu geben.

Ich erlaube mir einen kurzen Überblick der zur Erklärung von mir benutzten Prinzipien zu geben. Der Hauptsatz der empiristischen Ansicht ist: Die Sinnesempfindungen sind für unser Bewußtsein Zeichen, deren Bedeutung verstehen zu lernen unserem Verstande überlassen ist. Was die durch den Gesichtssinn erhaltenen Zeichen betrifft, so sind sie verschieden nach Intensität und Qualität, das heißt nach Helligkeit und Farbe, und außerdem muß noch eine Verschiedenheit derselben bestehen, welche abhängig ist von der Stelle der gereizten Netzhaut, ein sogenanntes Lokalzeichen. Die Lokalzeichen der Empfindungen des rechten Auges sind durchgängig von denen des linken verschieden.

Wir fühlen außerdem den Grad der Innervation, die wir den Augenmuskelnerven zufließen lassen. Die Anschauung der Raumverhältnisse und der Bewegung sind nicht notwendig aus den Gesichtswahrnehmungen, oder wenigstens nicht aus diesen allein, herzuleiten, da sie bei Blindgeborenen ganz genau und vollständig auch unter Vermittelung des Tastsinnes gewonnen werden, sie können also für unseren Zweck als gegeben vorausgesetzt werden.

Durch Erfahrung können wir offenbar lernen, welche anderen Empfindungen des Gesichts oder der anderen Sinne ein Objekt, welches wir sehen, uns machen wird, wenn wir die Augen oder unseren Körper fortbewegen und jenes Objekt von verschiedenen Seiten betrachten, betasten usw. Der Inbegriff aller dieser möglichen Empfindungen in eine Gesamtvorstellung zusammengefaßt, ist unsere Vorstellung von dem Körper, welche wir Wahrnehmung nennen, solange sie durch gegenwärtige Empfindungen unterstützt ist, Erinnerungsbild, wenn sie das nicht ist. In gewissem Sinne also, obgleich dem gewöhnlichen Sprachgebrauche widersprechend, ist auch eine solche Vorstellung von einem individuellen Objekte schon ein Begriff, weil sie alle die möglichen einzelnen

Empfindungsaggregate umfaßt, welche dieses Objekt, von verschiedenen Seiten betrachtet, berührt oder sonst untersucht, in uns hervorrufen kann. Das ist der tatsächliche und reelle Inhalt einer solchen Vorstellung von einem bestimmten Objekte; einen anderen hat sie nicht, und dieser Inhalt kann ohne Zweifel unter Voraussetzung der obengenannten Data durch Erfahrung gewonnen werden.

Die einzige psychische Tätigkeit, die dazu gefordert wird, ist die gesetzmäßig wiederkehrende Assoziation zweier Vorstellungen, die schon oft miteinander verbunden gewesen sind, welche Assoziation desto fester und zwingender wird, je öfter die Wiederholung stattgefunden hat.

Soweit also unsere durch Gesichtsbilder vermittelten Vorstellungen von den Objekten richtig sind, erklären sie sich einfach aus den vorangestellten Prinzipien. Es fragt sich nun aber, wie ist es möglich, daß Sinnestäuschungen vorkommen. Unter diesen müssen wir zwei Klassen unterscheiden. Erstens solche, bei denen die äußeren Umstände, unter denen die Einwirkung auf unsere Sinne geschieht, ungewöhnliche sind, wie bei der Betrachtung der optischen Bilder von Spiegeln, Linsen oder bei der Kombination stereoskopischer Darstellungen. Hier wird der Eindruck, den bestimmte Objekte machen, unter ungewöhnlichen Bedingungen erzeugt. Obgleich wir dies wissen, ruft der Eindruck nach dem Gesetze der Vorstellungsassoziationen doch die Vorstellung der der Regel nach mit ihm verbunden gewesenen anderen Sinneseindrücke, das heißt die Vorstellung des betreffenden Objekts hervor.

Die zweite Klasse von Sinnestäuschungen ist diejenige, wobei wir wirkliche Objekte bei ungewöhnlichem Gebrauche unserer Sinnesorgane falsch sehen. Zu ihrer Erklärung ist zu beachten, daß, sobald eine bestimmte Art des Gebrauchs unserer Sinneswerkzeuge geeignet ist, uns deutlichere und sicherere Wahrnehmungen der Objekte zu geben, als jede andere, wir jene, die wir deshalb die normale genannt haben, möglichst viel oder ausschließlich anzuwenden uns einüben. Brauchen wir dann unsere Sinnesorgane in abweichender Weise, so rufen die gewonnenen Eindrücke uns naturgemäß die Vorstellungen solcher Objekte hervor, welche beim normalen Gebrauche der Organe dieselben oder möglichst ähnliche Eindrücke gegeben haben würden.

Beim normalen Gebrauche der Augen kommt in Betracht, erstens, daß in jedem Auge die Zentralgrube der Netzhaut die deutlichste Unterscheidung nahe nebeneinander gelegener Bilder zuläßt, zweitens, daß wir deutliche Eindrücke nur behalten, wenn wir durch fortwährende Augenbewegungen die Ausbildung scharf gezeichneter Nachbilder vermeiden, drittens, daß wir an einer ausgedehnten Fläche von gleichmäßiger Beleuchtung alles deutlich gesehen haben, was an ihr deutlich zu sehen ist, wenn wir alle Teile ihres Umfangs deutlich gesehen haben. Daraus ergibt sich, daß wir beim normalen Gebrauche der Augen beide Blicklinien auf den Punkt richten, der gerade unsere Aufmerksamkeit in Anspruch nimmt, und die Augen für ihn akkommodieren, dieselben aber niemals längere Zeit unbewegt lassen, was auch dem eigentümlichen Bewegungstriebe unserer Aufmerksamkeit nicht entsprechen würde, vielmehr den Blick namentlich an den Konturen der gesehenen Objekte entlang laufen lassen.

Daraus folgt die gewohnheitsmäßige Verbindung der Bewegungen beider Augen miteinander und mit der Akkommodation; eine Gewohnheit, gegen die so schwer anzukämpfen ist und die doch jeden Augenblick durch willkürliche Anstrengung überwunden werden kann, wie oben gezeigt wurde, wenn man die

Augen allmählich unter Bedingungen bringt, wo nur mittels ungewöhnlicher Verbindungen die Zwecke des Sehens erreicht werden können. Daraus folgt ferner die Schwierigkeit, den Blick längere Zeit gegen die eingeübte Gewohnheit auf einem Punkte festzuhalten, daraus der große Einfluß hervortretender Konture auf unsere Aufmerksamkeit und auf die Bewegung unseres Blicks; daraus auch weiter, daß unsere Aufmerksamkeit so schwer zu einer genaueren Analyse der Erscheinungen des indirekten Sehens, des blinden Flecks, der Doppelbilder und so weiter, festzuhalten ist, indem wir gewohnheitsmäßig sogleich unseren Blick auf die die Aufmerksamkeit beschäftigenden Stellen hinzuwenden streben. Daher wir denn auch hauptsächlich wegen der gewohnheitsmäßig eintretenden Augenbewegungen selbst die stärker auseinander weichenden Doppelbilder der vor uns befindlichen Gegenstände nicht zu sehen pflegen und sie eben deshalb vielen, selbst erwachsenen Leuten unbekannt bleiben.

Daß die Verbindung zwischen der Raddrehung jedes einzelnen Auges und der Richtung der Gesichtslinie unter dieselbe Kategorie fällt, daß sie unter abgeänderten Bedingungen des Sehens zugunsten der optischen Zwecke selbst abgeändert werden kann, habe ich oben gezeigt und versucht, die Sicherheit der Orientierung, vermöge deren wir die unveränderte Lage ruhender Gegenstände trotz der Verschiebungen ihres Bildes auf der Netzhaut erkennen, als denjenigen Zweck nachzuweisen, der durch die Erfüllung des Listingschen Gesetzes für unsere Augenbewegungen so weit als möglich erreicht wird.

Da nachweisbar zugunsten von optischen Zwecken von allen diesen Gesetzen der Augenbewegungen Ausnahmen unter dem Einflusse willkürlicher Anstrengung eintreten können, so können diese Gesetze nicht auf mechanisch wirkende anatomische Einrichtungen begründet sein; andererseits halte ich es nicht für unmöglich, sondern sogar für wahrscheinlich, daß das Wachstum der Muskeln und vielleicht selbst die Leistungsfähigkeit der Nervenbahnen sich den Forderungen, die an sie gemacht werden, im Laufe jedes individuellen Lebens und vielleicht selbst durch Vererbung im Laufe des Lebens der Gattung so anpaßt, daß die geforderten zweckmäßigsten Bewegungen auch die leichtesten werden. Jedenfalls ist dieser anatomische Mechanismus, soweit ein solcher besteht, nur erleichternd, nicht zwingend.

Mittels der Augenbewegungen ist es ferner möglich, die Ordnung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde kennen zu lernen, das heißt, zu lernen, welche Lokalzeichen der Empfindungen den einander unmittelbar benachbarten Punkten entsprechen. Das spezielle Gesetz der Augenbewegungen bestimmt dann weiter welche Raumgrößen des Gesichtsfeldes ihrer Größe nach genau miteinander verglichen werden können, welche nicht. Genau verglichen werden diejenigen, deren Bild durch bloße Bewegung des Auges auf denselben Punkten oder Linien der Netzhaut abgebildet werden kann; eine Regel, welche durch die Tatsachen durchaus bestätigt wird. Dagegen finden sich bei der Vergleichung solcher Raumgrößen, die nicht auf denselben Netzhautteilen abgebildet werden können, teils konstante, teils inkonstante Fehler. Die konstanten Fehler lassen sich zum Teil darauf zurückführen, daß wir (wenigsten als Kinder, während der Ausbildung unseres Auges) als häufigstes Gesichtsobjekt entferntere Gegenstände und den bis zu ihnen hin sich erstreckenden Fußboden vor Augen haben. Ich erinnere an die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane und an die falsche Zeichnung der Quadrate.

Endlich zeigt sich der Einfluß des Gesetzes der Augenbewegungen auch

in der Führung der scheinbar geraden (oder kürzesten) Linien des Gesichtsfeldes. Verlegen wir die Blicklinie in ihre Primärlage, welche wir als ihre häufigste und wichtigste Stellung betrachten dürfen, so sind es diejenigen Linien, die nach dem Gesetze der Augenbewegungen sich in sich selbst verschieben können.

Ich habe die Ableitung dieser Gesetze auf gar keine bestimmte Annahme über die Art der Lokalzeichen begründet. Sie würde passen, auch wenn diese Zeichen ganz willkürlich über die Netzhaut ausgewürfelt wären, ohne daß irgendwelche Ähnlichkeit der Lokalzeichen benachbarter Punkte vorausgesetzt würde. Es würde dadurch allerdings die Schwierigkeit der Einübung beträchtlich erhöht werden. Ich halte es dagegen nicht für unwahrscheinlich und der Analogie anderer organischer Einrichtungen gemäß, daß die Lokalzeichen benachbarter Punkte einander ähnlicher seien, als die entfernter Punkte, und daß somit die Art des Lokalzeichens eine kontinuierliche Funktion der Koordinaten der Netzhautpunkte sei. Indessen wie auch dieses System der Lokalzeichen, von welcher Art sie selbst sein mögen, so kann ihre besondere Einrichtung die Orientierung wohl erleichtern; aber auch hier fordern die Konsequenzen der empiristischen Theorie, mit denen die Erscheinungen durchaus übereinstimmen, daß jede solche Einrichtung nur erleichternd für die Einübung des Augenmaßes, nicht entscheidend für seine definitiven Resultate sei.

Zu diesen anatomischen Einrichtungen gehört dann auch die Zahl der empfindlichen Elemente zwischen je zwei Netzhautpunkten. Diese mag namentlich bei der Unterscheidung sehr kleiner Distanzen nicht unwichtig sein, nach dem Gesetze, daß deutlich unterscheidbare Größen beim Mangel anderer Hilfsmittel der Beurteilung uns größer erscheinen, als undeutlich unterscheidbare. Daß die Anzahl der empfindlichen Elemente bei der Schätzung der größeren Distanzen ohne allen Einfluß sei, ist oben gezeigt worden.

Für die empiristische Theorie ist es übrigens ganz gleichgültig, wie die Netzhaut gestaltet ist, wie das Bild auf ihr liegt und wie es verzerrt ist, wenn es nur scharf begrenzt ist; sie hat es nur und allein zu tun mit der Projektion der Netzhaut, welche die optischen Medien nach außen entwerfen.

Die Richtung, in der die gesehenen Objekte sich zu unserem Körper befinden, wird beurteilt mit Hilfe der Innervationsgefühle der Augenmuskelnerven, aber fortdauernd kontrolliert nach dem Erfolge, das heißt nach der Verschiebung der Bilder, welche die Innervationen hervorbringen. Sehen wir durch Prismen und nehmen wir dabei Bewegungen mit unserem Körper und unseren im Gesichtsfelde erscheinenden Händen vor, so lernen wir bald, trotz der falschen Richtung der einfallenden Strahlen durch das Prisma richtig sehen. Die Erscheinungen des Bewegungsschwindels zeigen ebenso eine Veränderung in der Beurteilung der Wirkung gewisser Innervationen an.

Wir beurteilen den absoluten Grad der Konvergenz unsicherer, als die gleich gerichteten Bewegungen beider Augen, vielleicht weil für die Konvergenz eine anhaltendere Ermüdung zustande kommen kann, welcher nicht durch Ermüdung für Divergenz das Gleichgewicht gehalten wird, während eine längere Wendung der Augen nach rechts nicht leicht ohne dazwischenfallende Wendungen nach links vorkommen möchte, wobei die Ermüdung sich gleichmäßiger auf die antagonistischen Muskeln verteilt.

Teils deshalb, teils aber auch, weil wir konsequent die subjektiven Momente in unseren Sinnesempfindungen unbeachtet lassen und also bei Fixierung eines

nahen Gegenstandes die ganze Summe von Gesichtseindrücken und Innervationsgefühlen nur als das sinnliche Zeichen für ein dort gelegenes Objekt betrachten, ohne zu analysieren, welche Eindrücke dem rechten oder linken Auge angehören, welche Stellung dieses oder jenes hat, beurteilen wir die Richtung der Objekte gegen unseren Körper nach der gemeinsamen mittleren Richtung beider Augen, auch wenn wir nur mit einem Auge das Objekt wirklich sehen. Es entspricht dies der Regel, daß wir bei Eindrücken, die wir unter ungewöhnlicher Art des Gebrauches der Organe (einäugigem Sehen) erhalten, nach der Ähnlichkeit mit den Eindrücken bei normalem Gebrauch (doppeläugigem Sehen urteilen; daher die von J. Towne und E. Hering aufgefundene Regel für die Projektion der Gesichtsbilder nach außen, mit den Modifikationen, die ich für die Raddrehungen bei schrägen Blickrichtungen habe anbringen müssen.

Wir kommen jetzt zum doppeläugigen Sehen. Solange wir im objektiven Gebiete verweilen, beim Sehen von Körpern oder von stereoskopischen Bildern, sind die Erscheinungen einfach zu erklären und leicht verständlich nach der empiristischen Theorie; auch ist der Einfluß der Erfahrung in diesem Gebiete meistens selbst von den Anhängern nativistischer Theorien, mit Ausnahme einiger der neusten Arbeiten, anerkannt worden. Die Täuschungen, welche hier vorkommen, erklären sich aus der Unsicherheit der Schätzung der Konvergenz. Wenn wir den Augen Bilder zeigen, welche von reellen Objekten nur bei einem bestimmten Grade der Konvergenz gegeben sein könnten, so geben wir ihnen die entsprechende Deutung, auch wenn zurzeit wirklich ein anderer Grad von Konvergenz besteht. Dazu kommt, daß wir wegen der mangelnden Sicherheit des Konvergenzgefühls, auch keine Sicherheit in der Beurteilung der Differenzen der Raddrehungen haben, welche die konvergenten Augen bei gehobener und gesenkter Blickebene zeigen. Wenn daher die Abweichungen in den Linien der gesehenen Bilder uns nicht aufmerksam machen, daß Drehung vorhanden sei, so urteilen wir so, als ob keine da wäre, und es treten dann die von Recklinghausen und von Hering beschriebenen Täuschungen ein.

Wenn nun aber bei festgehaltenem Fixationspunkte die Aufmerksamkeit der flächenhaften Anordnung der Gegenstände im Gesichtsfelde zugelenkt wird, so sieht jedes Auge eine andere Anordnung derselben und die beiden Bilder können nicht ganz kongruieren; wenn also einzelne Punkte derselben kongruieren, so müssen andere Punkte der Bilder disparat sein und diese erscheinen dann an zwei verschiedenen Stellen des gemeinschaftlichen Sehfeldes, als Doppelbilder. Punkte der Netzhäute, beziehlich Punkte der beiden Sehfelder, deren Bilder im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde zusammenfallen, hat man identische oder korrespondierende Punkte genannt.

In bezug auf die Natur der korrespondierenden Punkte ergeben nun die Tatsachen mit Entschiedenheit so viel:

1. Die Bilder korrespondierender Punkte werden in der Regel in dieselbe, die Bilder nicht korrespondierender Punkte in verschiedene Stellen des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes verlegt; doch kommen kleinere Abweichungen von beiden Teilen dieser Regel vor, wenn wir die beiden Bilder zur Anschauung eines körperlichen Objekts vereinigen.

2. Die Empfindungen, welche durch die Erregung korrespondierender Netzhautpunkte hervorgebracht werden, sind nicht identisch, sondern verschieden. Wir müssen dies notwendig schließen aus der Tatsache, daß wir auch beim Lichte des elektrischen Funkens von einer stereoskopischen Linienzeichnung

immer das richtige Relief erhalten. Wären die Empfindungen korrespondierender Punkte ununterscheidbar gleich, so müßte ebenso oft und ebensoleicht das umgekehrte Relief erscheinen.[1] Wir schließen dasselbe zweitens daraus, daß verschiedene Beleuchtung oder Färbung entsprechender Flächen in zwei stereoskopischen Bildern eine andere Anschauung, nämlich die des Glanzes, hervorbringt als jede, wie immer gewählte, gleichartige Färbung beider Flächen. Daß hierbei Augenbewegungen und der Wettstreit der beiden Sehfelder keinen Einfluß haben, zeigt sich namentlich bei der Beleuchtung auch dieser Bilder mit dem elektrischen Funken.

3. Unter dem Einfluß habitueller abnormer Augenstellungen bei Schielenden ändert sich das Verhältnis der Korrespondenz der beiden Netzhäute.

Hieraus schließe ich, daß jede anatomische Hypothese unzulässig ist und unvereinbar mit den Tatsachen, welche eine vollständige Verschmelzung der beiderseitigen Empfindungen voraussetzt, also namentlich jede, welche eine Vereinigung der von korrespondierenden Netzhautstellen kommenden Fasern zu einer Faser annimmt, die den beiderseitigen Eindruck ungetrennt dem Gehirne zuleiten soll. Nur eine solche Form der anatomischen Hypothese würde mir zulässig erscheinen, wonach beide Eindrücke teils gesondert, teils aber auch mit einer gemeinsamen oder gleichen Wirkung im Gehirn zur Perzeption kommen: also etwa so, daß die Faser A von dem rechten Auge sich spaltet in die Fasern a und α, die korrespondierende Faser B in die Fasern b und β, daß a und b gesondert in das Zentralorgan des Sehens eintreten und verschiedene Eindrücke hervorbringen, α und β aber sich vereinigen, um einen beiden gemeinsamen dritten Eindruck zu machen.

Eine so modifizierte Annahme würde mir zulässig, aber weder wahrscheinlich noch notwendig erscheinen. Vielmehr ergeben die Konsequenzen der bisher aufgestellten Erklärungen auch hier eine, wie mir scheint, vollständig genügende Erklärung ohne eine solche Annahme. Beim normalen Sehen sind immer die Blicklinien auf denselben objektiven Punkt gerichtet, dem gleichzeitig auch die Aufmerksamkeit zugewendet ist; auf allen anderen Punkten der Netzhäute dagegen kommen bald gleiche, bald ungleiche Eindrücke vor; daher wird vor allen Dingen die Lokalisation der Eindrücke der Netzhautgruben eine übereinstimmende. Ist es dagegen wegen einer Erkrankung der Muskeln nicht möglich die dazu gehörige Stellung der Augen herbeizuführen, und wird dafür eine andere Stellung habituell, so bestimmt diese auch, mit welchem Punkte der anderen Netzhaut die Netzhautgrube jedes Auges korrespondent wird.

Die Identität der Meridiane bestimmt sich danach, wo sich am häufigsten Reihen derselben Punkte abbilden. Dies geschieht zunächst in der Primärstellung der Blickebene, die wir als mittlere und gewöhnlichste Stellung dieser Ebene betrachten dürfen, auf den Netzhauthorizonten. Demnächst scheinen bei vielen normalsichtigen Augen die nach dem Horizont hinlaufenden Linien des Fußbodens einen bestimmenden Einfluß auf die Lage der vertikalen korrespondierenden Meridiane auszuüben.

[1] DONDERS gibt an (*Anomalies of accommodation and refraction.* London 1864. p. 162 und 166), daß bei unbewegtem Auge oft das pseudoskopische Bild statt des stereoskopischen erscheine. In einer eben erschienenen Abhandlung im Nederlandsch Archief (1866), wo er ähnliche Vorsichtsmaßregeln angewendet hat, wie oben S. 373 angegeben sind, hat er aber im wesentlichen dieselben Resultate, wie AUBERT und ich erhalten.

Sind diese beiden Paare korrespondierender Meridiane bestimmt, so bestimmen sich die übrigen Abmessungen der Sehfelder und damit die Lage der kongruierenden Punkte in beiden vollständig nach dem oben beschriebenen Verfahren mittels der Augenbewegungen.

Da hiernach die Vergleichung der Dimensionen beider Sehfelder und die Lage der kongruenten Punkte in ihnen ein Ergebnis der Ausbildung des Augenmaßes ist, so sind kleine Irrungen in diesen Abmessungen möglich, wenn sich mit großer Lebhaftigkeit die Anschauung körperlicher Einheit der beiden Bilder aufdrängt. Sind die Entfernungen der Doppelbilder voneinander dagegen sehr auffallend, so kann eine annähernd richtige Deutung derselben mit der Wahrnehmung ihrer Trennung im Gesichtsfelde zusammen bestehen. Alles, was die Vereinigung der Doppelbilder zum körperlichen Anschauungsbilde erschwert oder die Vergleichung ihrer Lage im Gesichtsfelde erleichtert, Vermeidung aller Augenbewegungen und Übung in ihrer Beobachtung macht sie leichter sichtbar. Je nach der Richtung der Aufmerksamkeit kann man solche, die an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegen, auch beim Lichte des elektrischen Funkens, welches allen Einfluß der Augenbewegungen aufhebt, bald sehen, bald nicht sehen. Alles dies sind Umstände, die mit der aufgestellten Erklärung sehr gut zusammenstimmen und aus ihr hergeleitet werden können.

Die Erscheinungen des Wettstreits endlich hängen von der Eigentümlichkeit unseres Bewußtseins ab, daß es entweder nur einen Eindruck auf einmal, oder nur ein solches Aggregat von Eindrücken aufnehmen kann, die sich zu einer einfachen Vorstellung verbinden. Abgesehen von den bekannten täglichen Erfahrungen, zeigt sich diese Eigentümlichkeit desselben sehr deutlich bei der bekannten Zeitdifferenz zwischen den Gesichts- und Gehörwahrnehmungen in der astronomischen Beobachtung der Sterndurchgänge, ferner in der kleinen Zahl von Gesichtsobjekten, die man beim Lichte des elektrischen Funkens und während der kurzen Nachdauer seines Eindrucks wahrnehmen kann. Die Form der Vereinigung der Eindrücke beider Sehfelder ist die Anschauung körperlicher Objekte. Wo diese wegen der Art der beiden Bilder mißlingt, tritt das im Wettstreit der Sehfelder sich zeigende Schwanken der Aufmerksamkeit ein, wenn diese nicht durch scharfgezeichnete Konture des einen Feldes gefesselt ist. Ich habe oben die Methoden beschrieben, nach denen es gelingt, die Aufmerksamkeit auf eines der Felder zu fesseln und dem Schwanken ein Ende zu machen. Dadurch besonders kann auch der Nachweis geführt werden, daß dieser Wettstreit nur ein Phänomen der Aufmerksamkeit ist.

Aus dieser Übersicht der aufgestellten Erklärungen geht hervor, daß dabei von den psychischen Vorgängen nur die unwillkürlich erfolgenden der Ideenassoziation und des unwillkürlichen Flusses der Vorstellungen in Betracht kommen, welche nicht unter der direkten Herrschaft unseres Selbstbewußtseins und unseres Willens stehen, wenn wir auch dadurch, daß wir selbstbewußte Vorstellungen und Zwecke mit jenen in Konkurrenz bringen, einen gewissen Einfluß auf deren Lauf haben können. Eben darin liegt es nun, daß die Ergebnisse jenes Ablaufs der Vorstellungen uns entgegentreten als durch eine Macht gegeben, die wir nicht oder nur zum kleinen Teile beherrschen können, und die unserem Willen und Selbstbewußtsein daher als eine fremde, objektive Naturmacht entgegentritt, gerade wie die unmittelbar von außen gegebenen, sinnlichen Empfindungen. Was also von Resultaten psychischer Vorgänge dieser Art sich mit den Sinnesempfindungen verbindet, erscheint uns ebenso durch

äußeren Einfluß gegeben wie die unmittelbare Empfindung, und nicht durch selbstbewußte und freie Überlegung gefunden, nicht von uns erdacht. In dieser Beziehung hat die empiristische Ansicht vielfältiges Mißverständnis von Anhängern sowohl als von Gegnern erfahren, und ich mache deshalb auf diesen Punkt noch besonders aufmerksam. Will man diese Vorgänge der Assoziation und des natürlichen Flusses der Vorstellungen nicht zu den Seelentätigkeiten rechnen, sondern sie der Nervensubstanz zuschreiben, so will ich um den Namen nicht streiten. Hier würde die empiristische Theorie mit derjenigen Form der nativistischen, wie sie Panum z. B. aufgestellt hat, sich vielleicht vereinigen lassen, nur daß er als natürlich gegeben ansieht, was mir nur durch die Erfahrung gewonnen zu sein scheint.

Was nun die verschiedenen nativistischen Theorien betrifft, so ist ihr Kernpunkt, daß sie die Lokalisation der Eindrücke im Gesichtsfelde von einer angeborenen Einrichtung ableiten, entweder so, daß die Seele eine direkte Kenntnis der Ausdehnungen der Netzhaut haben soll, oder so, daß infolge der Reizung bestimmter Nervenfasern gewisse Raumvorstellungen vermittelst eines angeborenen, nicht weiter definierbaren Mechanismus entstehen. J. Müller namentlich hat diese Ansicht in der ersten Form durchgeführt. Er sagt[1]: „Der Begriff des Raumes kann nicht erzogen werden, vielmehr ist die Anschauung des Raumes und der Zeit eine notwendige Voraussetzung, selbst Anschauungsform für alle Empfindungen. Sobald empfunden wird, wird auch in jenen Anschauungsformen empfunden. Was aber den erfüllten Raum betrifft, so empfinden wir überall nichts, als nur uns selbst räumlich, wenn lediglich von Empfindung, von Sinn die Rede ist; und so viel unterscheiden wir von einem objektiven erfüllten Raum durch das Urteil, als Raumteile unserer selbst im Zustande der Affektion sind, mit dem begleitenden Bewußtsein der äußeren Ursache der Sinneserregung. Die Netzhaut sieht in jedem Sehfelde nur sich selbst in ihrer räumlichen Ausdehnung im Zustande der Affektion; sie empfindet sich selbst in der größten Ruhe und Abgeschlossenheit des Auges räumlich dunkel."

Diese Ansicht erweitert daher die von Kant aufgestellte Ansicht, daß Raum und Zeit ursprünglich gegebene Formen unserer Anschauungen seien, dahin, daß auch die spezielle Lokalisation jedes Eindrucks durch die unmittelbare Anschauung gegeben sei. Die meisten deutschen Physiologen folgten dieser Ansicht von Müller, und es wurden von ihnen mancherlei Erklärungen der Gesichtserscheinungen auf die besonderen Eigentümlichkeiten der Form der Netzhautbilder gebaut. So hat Recklinghausen[2] die Abweichung der scheinbar rechten Winkel dadurch zu erklären versucht, daß die Fläche der Netzhaut schief gegen die Gesichtslinie des Auges gerichtet sei und deshalb die optischen Bilder eines rechten Winkels in dem Netzhautbilde schiefwinklig werden könnten. Diese Beschaffenheit der Netzhautbilder sollte dann unmittelbar wahrgenommen werden können. E. Hering[3] und A. Kundt[4] haben sogar angenommen, die Seele schaute die Entfernungen zwischen zwei Netzhautpunkten direkt nicht nach dem Bogen auf der Netzhaut, sondern nach der Sehne an, und versuchten daraus die Erklärung der oben beschriebenen Täuschungen der monokularen

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. S. 54 ff.
[2] Netzhautfunktionen im Archiv für Ophthalmologie. V, 2. S. 128—141.
[3] Beiträge zur Physiologie. Heft 1. S. 65—80.
[4] Poggendorffs Annalen. 1863. CXX. 118—158.

Lokalisation im Gesichtsfelde herzuleiten. Daß diese Hypothese zur Erklärung derjenigen Erscheinungen, zu deren Gunsten sie allein erfunden ist, keineswegs genügt, ist oben schon angeführt worden.

Die besprochene Annahme der nativistischen Theorien ist eigentlich eine Verzichtleistung auf jede Erklärung der Lokalisationsphänomene. Darüber läßt sich natürlich nicht weiter rechten, und namentlich kann es J. Müller in keiner Weise zum Tadel gereichen, daß er zu einer Zeit, wo noch alle Beobachtungen über das Gesetz der Augenbewegungen fehlten, und aus einem Versuche, diese für die Erklärung der Lokalisation zu gebrauchen, nichts als ganz vage Folgerungen gezogen werden konnten, in seinen Erklärungsversuchen nicht weiter zu gehen geneigt war. Daß dagegen aus dem Gesetze der Augenbewegungen, soweit wir es bisher in seinen Grundzügen kennen, sich auch die Grundzüge des Augenmaßes herleiten lassen, die in der nativistischen Ansicht gar keine weitere Erklärung finden, habe ich oben zu zeigen mich bemüht.

Eine notwendige Konsequenz der erwähnten Ansicht, daß die Lokalisation der Eindrücke im Gesichtsfelde ursprünglich gegeben sei, ist dann die, daß auch ursprünglich gegeben sein muß, welche Punkte der einen Netzhaut mit denen der anderen dieselbe Lokalisation geben, also korrespondierend, oder, wie die nativistische Ansicht es bezeichnet hat, identisch sind. Hier in der Lehre von der angeborenen und anatomisch begründeten Identität, welche also als eine notwendige Konsequenz der nativistischen Ansicht betrachtet werden muß, treten nun aber die schon oben bezeichneten wesentlichen Schwierigkeiten dieser Ansicht auf; daher dieses Gebiet auch immer der Haupttummelplatz der Streitigkeiten gewesen ist.

Erstens nämlich konnten die Beobachtungen der körperlich ausgedehnten Objekte schon lehren, und zeigte namentlich die Erfindung des Stereoskops durch Wheatstone, daß wir keineswegs immer Doppelbilder sehen, wo nach der strengen Identitätstheorie dergleichen zu erwarten sind, und daß dieselben unter dem Einflusse der Anschauung körperlicher Ausdehnung verschwinden. Nun wurde zwar von Brücke mit Recht der große Einfluß der Augenbewegungen hierbei hervorgehoben; indessen auch wenn man diesen Einfluß eliminiert, bleibt doch immer die Tatsache bestehen, daß auch der geübteste Beobachter gewisse einander nahestehende ähnliche Doppelbilder miteinander untrennbar verschmilzt, während er einander ebenso nahestehende ähnliche Bilder im monokularen Felde, oder in der Färbung verschiedene Bilder im binokularen Felde mit der größten Leichtigkeit voneinander unterscheidet. Noch größeren Anstoß haben die Anhänger der Identitätstheorie an der von Wheatstone behaupteten Tatsache genommen, daß unter Umständen auch die Eindrücke identischer Netzhautpunkte getrennt und an zwei verschiedene nebeneinander liegende Stellen des Objekts verlegt werden könnten. Daß das letztere aber eine notwendige Konsequenz des ersteren sei und bei richtig angestellten Versuchen auch tatsächlich beobachtet werde, habe ich oben ausgeführt. Man muß nur nicht, wie es von den Gegnern der Behauptung Wheatstones immer geschehen ist, verlangen, daß bei der Trennung identischer Eindrücke viel mehr geleistet werde, als bei der Vereinigung disparater Eindrücke unter gleichen Umständen geleistet werden kann.

Das wesentliche Gewicht der Tatsachen anerkennend, stellte Panum eine Modifikation der Identitätstheorie auf, wonach jeder Punkt a der einen Netz-

haut einem gewissen korrespondierenden Empfindungskreise A in der anderen identisch sein sollte, so daß das Bild des Punktes a verschmelzen könnte mit einem Bilde auf jedem einzelnen Punkte von A, welches ähnliche Konturen darböte. Dabei sollte aber eine verschiedene Tiefenwahrnehmung entstehen, wenn a mit verschiedenen Punkten des Kreises A verschmölze. Ob es mit diesem oder jenem verschmölze, sollte davon abhängen, wo sich im Empfindungskreise A eine Kontur vorfände, die der durch a hinziehenden ähnlich sei. Aus den Wettstreitserscheinungen beweist PANUM die dominierende Macht der Konture im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beider Augen, wobei er freilich wohl den Sieg der Konture als zu unbedingt und dauernd betrachtet hat. Wettstreit findet nach ihm hauptsächlich zwischen unähnlichen, aber nahe gleich starken Farben und Konturen statt. Ähnliche streben zu verschmelzen.

Wenn man die von PANUM aufgestellten Sätze bloß als zusammenfassenden Ausdruck der Tatsachen ansehen will, was er selbst auch als das Wesentlichere und Wichtigere betont, so sind sie der Hauptsache nach richtig. Ich würde gegen seine Darstellung der Tatsachen nur einzuwenden haben, 1. daß ich mich von der wirklichen Existenz binokulärer Mischfarben auch in den von ihm beschriebenen Versuchen nicht habe überzeugen können, 2. daß Herr PANUM keine genügenden Methoden, die Aufmerksamkeit zu fesseln, angewendet und daher die große Rolle, welche die Aufmerksamkeit bei dem Wettstreite der Sehfelder und bei der Unterscheidung der Doppelbilder spielt, nicht genügend erkannt hat. 3. Daß er die Augenbewegungen beim Fixieren der Bilder für teilweis unwillkürliche Reflexbewegungen hält, während ich selbst bei mir wohl eine Neigung zu gewissen gewohnheitsmäßigen Stellungen anerkennen kann, die aber nicht im geringsten die Willkür der Bewegung beeinflußt, wenn ich eine andere Stellung der Blickpunkte hervorzubringen wünsche. 4. Daß bei der Verschmelzung der Doppelbilder doch nicht bloß die Ähnlichkeit der Konture und der Grad der Annäherung an eine korrespondierende Lagerung entscheidet, sondern auch die Anwesenheit oder Abwesenheit anderer Vergleichungspunkte für die richtige Abmessung der scheinbaren Lage beider Konture im gemeinsamen Gesichtsfelde. Das letztere hatten schon BERGMANNS[1] Versuche gezeigt, und in ähnlicher Weise zeigt es der oben S. 374 beschriebene Versuch an Fig. U, selbst wenn man von VOLKMANNS Versuchen absehen wollte, gegen welche PANUM den Einwand erhoben hat, daß in ihnen kleine, wenn auch unbedeutende Veränderungen der Konture durch zugesetzte Linien und Punkte angebracht sind, die an der Stelle das Verschmelzen hindern. Aber wie BERGMANNS und meine Versuche zeigen, hindern auch korrespondierend gelegene Linien, welche beide auf der gleichen Seite von zwei disparaten liegen und die Ähnlichkeit von deren Konturen gar nicht beeinträchtigen, das Verschmelzen derselben, welches ohne die Anwesenheit jener korrespondierenden Linien eintreten würde.

Die von Herrn PANUM aufgestellten Erklärungen sind nun nach den Verwahrungen und Erläuterungen derselben, die er in seiner zweiten Arbeit[2] dazu gegeben hat, kaum etwas mehr, als daß jede Klasse von Beobachtungen zu einem besonderen Vermögen der Nervenapparate erhoben wird. So schreibt er den beiden Augen oder ihren Nervenapparaten eine binokulare Energie der Farbenmischung zu, vermöge deren sich binokular gesehene Farben

[1] Göttinger gelehrte Anzeigen. 1859. S. 1055–1063.

[2] REICHERT und DU BOIS-REYMOND, Archiv für Anat. und Physiol. 1861. S. 63–111.

zur Mischfarbe vereinigen können. Daneben gibt es aber auch eine andere binokulare Synergie des Alternierens, vermöge deren binokular gesehene Farben sich auch nicht vereinigen, sondern in Wettstreit geraten können. Die letztere soll überwiegen, wenn die beiderseitig einwirkenden Erregungen sehr intensiv, oder die Erregbarkeit des Sehorganes sehr groß ist. Disparate Bilder können vereinigt werden mittels einer dritten binokularen Synergie des Einfachsehens durch korrespondierende Empfindungskreise. Die Tiefenwahrnehmung endlich kommt zustande mittels einer vierten spezifischen Synergie der binokularen Parallaxe.

Die Konture der Figuren werden als besonders starke Nervenreize betrachtet und die Augenstellungen im wesentlichen als unwillkürlich eintretende Reflexbewegungen, und auch in bezug auf die genannten Synergien betont es Herr PANUM besonders, daß sie als physiologische, nicht als psychische Kräfte zu betrachten seien.

Ich muß gestehen, daß ich nicht klar verstanden habe, in welcher Weise Herr PANUM sich denkt, daß neben der Verschmelzung disparater Punkte in korrespondierenden Empfindungskreisen doch der Hauptsatz der Identitätslehre, wonach die Eindrücke identischer Stellen verschmelzen müssen, noch bestehen könne, auf welchen wirklichen oder anscheinenden Widerspruch Herr VOLKMANN aufmerksam gemacht hatte. Herr PANUM erklärt, seine Sätze behaupteten, daß die Eindrücke, welche korrespondierenden Empfindungskreisen angehören, verschmelzen könnten, die aber auf identischen Stellen verschmelzen müßten. Daraus würde aber doch immer folgen, daß, so oft der Eindruck a einer Netzhaut mit dem einer disparaten Stelle β verschmilzt, notwendig auch a mit dem der identischen Stelle α der zweiten Netzhaut, folglich auch α und β, zwei Stellen desselben Bildes miteinander verschmelzen müssen, wenn nicht eines von ihnen ausgelöscht wird, was jedenfalls in vielen Fällen, wie in den oben beschriebenen Versuchen, nicht der Fall ist. In Figuren wie M und N Taf. III sind beide identisch liegende, aber nicht verschmelzende Linien durch Konture hervorgehoben; keine von ihnen verschwindet durch Wettstreit mit der anderen, sonst könnte keine stereoskopische Tiefenwahrnehmung durch ihre Vereinigung mit einer disparaten Linie des anderen Bildes auch in der Beleuchtung durch den elektrischen Funken zustande kommen. Ebenso müssen zwischen zwei verschmelzenden disparaten Grenzlinien verschieden gefärbter Flächen immer gewisse identische Punkte existieren, für welche der Wettstreit der durch die benachbarten Konture hervorgetriebenen Farben im Gleichgewicht ist und die also beide gesehen und dabei an verschiedene Punkte des angeschauten körperlichen Objekts verlegt werden. Übrigens ist dieser Streitpunkt, soviel ich einsehe, unerheblich für die Theorie; ich muß ihn außerdem nach dem Ergebnis meiner eigenen Beobachtungen zugunsten von WHEATSTONES Behauptung als erledigt betrachten. Wenn man auch die Notwendigkeit der Verschmelzung der Eindrücke auf identischen Stellen fallen läßt, so behalten dieselben doch immer die faktische Bedeutung, daß ähnliche Eindrücke beider Netzhäute desto leichter verschmelzen, je näher sie an identische Stellen treffen. Das scheint mir auch die einzig richtige Beschreibung des Identitätsverhältnisses zu sein, was man übrigens auch als seinen Grund betrachten möge, und dadurch daß Herr PANUM dieses Verhältnis durch bezeichnende Ausdrücke scharf hervorgehoben hat, hat er einen wesentlichen Fortschritt in der Lehre vom binokularen Sehen bewirkt, den ich gern anerkenne; auch würde ich gewiß der letzte sein, der gegen seine

Sehen und Vorsicht in der theoretischen Verallgemeinerung der beobachteten Tatsachen Einspruch erhöbe, und würde seine theoretischen Versuche, die er selbst als Nebensache zu betrachten auffordert, hier nicht kritisiert haben, wenn ich nicht überhaupt die möglichen Erklärungsformen des vorliegenden Gebiets zu besprechen genötigt wäre, und wenn nicht ein Teil von PANUMs theoretischen Ansichten auch die Grundlage der unten zu besprechenden neueren Theorie von E. HERING bildete.

Der Leser wird aus der gegebenen Übersicht entnehmen, daß die Erklärungen, welche Herr PANUM gibt, wenigstens soweit sie sich auf die Verschmelzung und den Wettstreit der Bilder beziehen, in der Tat nur der Form nach Erklärungen sind, indem die Tatsachen in einem abstrakten Begriff zusammengefaßt werden, und nur in der Verwahrung gegen die Einmischung psychischer Vorgänge, welche sich aber überall auf unvollständige Beobachtung der Tatsachen stützt, beziehen sie sich wenigstens negativ auf das ursächliche Verhältnis. Übrigens werden in ihnen der Nervensubstanz Formen der Tätigkeit beigelegt, die wir wohl aus dem Gebiete der niederen Seelentätigkeiten kennen, aber denen Ähnliches im Gebiete der Körperwelt noch niemals aufgefunden ist.

In deutlicherer und fester ausgebildeter Gestalt kehren uns die Grundzüge der Theorie von PANUM in der von E. HERING aufgestellten Theorie des binokularen Sehens entgegen. Diese Theorie ist überhaupt unter den bis jetzt aufgestellten wohl die konsequenteste Form, welche die nativistische Theorie erhalten hat, und verdient deshalb eine eingehendere Besprechung. Ein bedeutender Fortschritt der HERINGschen Theorie liegt darin, daß sie von einer richtigeren Kenntnis der scheinbaren Sehrichtung der angeschauten Objekte ausgeht, wodurch wesentliche Schwierigkeiten der früheren Theorien beseitigt werden.

Herr HERING nimmt an, daß die einzelnen Netzhautpunkte im erregten Zustande außer den Farbenempfindungen noch dreierlei verschiedene Arten von Raumgefühlen hervorrufen. Ein erstes entspricht dem Höhenwert der betreffenden Netzhautstelle, das zweite dem Breitenwert. Die Höhengefühle und Breitengefühle, welche zusammen das Richtungsgefühl für den Ort im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde ergeben, sind für korrespondierende Netzhautpunkte gleich. Außerdem existiert ein drittes Raumgefühl besonderer Art, ein Tiefengefühl, welches in je zwei identischen Netzhautpunkten gleiche, aber entgegengesetzte Werte, dagegen auf symmetrisch gleich gelegenen gleiche und gleichsinnige Werte haben soll. Das Tiefengefühl der äußeren Netzhauthälften ist positiv, das heißt entspricht größerer Tiefe, das der inneren Netzhauthälften negativ, das heißt entspricht größerer Annäherung.

Durch diese Annahme ist zunächst das oben schon von mir bezeichnete notwendige Erfordernis einer mit den Tatsachen vereinbaren Identitätstheorie erfüllt; die Eindrücke korrespondierender Netzhautstellen sind zwar teilweise gleich, nämlich betreffs ihres Richtungsgefühls, teilweise aber verschieden, nämlich durch ihr Tiefengefühl. Bis hierher würde ich die Annahmen von HERING sogar für die von mir vertretene empiristische Theorie zwar nicht notwendig, aber vorteilhaft finden, eine solche Annahme würde die Erklärung der Einübung des Augenmaßes in der Erziehung des Gesichtsinns wesentlich erleichtern. Nur wären dabei die „Raumgefühle“ als Lokalzeichen zu betrachten, deren räumliche Bedeutung erst durch Erfahrung zu lernen wäre. Gleiche Zeichen aber für das bezeichnete Gleiche zu haben, würde offenbar vorteilhaft sein.

Nur in einer Beziehung macht die Abweichung der scheinbar vertikalen und identischen Meridiane eine Abweichung von den Heringschen Annahmen nötig für diejenigen Augen, die damit behaftet sind, nach den Versuchen die ich selbst und Herr Dastich angestellt haben. Die Höhen- und Breitenwerte nämlich würden bei uns ebenfalls für identische Stellen gleich zu nehmen sein, aber die positiven und negativen Tiefenwerte würden nicht durch die korrespondierenden scheinbar vertikalen Meridiane, sondern durch die wirklich vertikalen Meridiane zu scheiden sein. Wir sehen nämlich bei symmetrischer Augenstellung, wie ich schon oben bemerkt habe, eine Linie, die auf den beiden wirklich vertikalen, aber nicht identischen Meridianen abgebildet ist, senkrecht zur Visierebene, dagegen eine solche, die auf den beiden scheinbar vertikalen identischen Meridianen abgebildet ist, gegen den Beobachter geneigt, mit ihrem oberen Ende entfernter als mit dem unteren. Soviel ich sehe, hat diese Abweichung weiter keinen Einfluß auf die ferneren Konsequenzen der Theorie.

Nun stoßen wir freilich auch bei Hering wieder auf das Mysterium der Identitätslehre: Auf Deckpunkte (d. h. korrespondierende Punkte) fallende gleiche oder verschiedene Lichtreize lösen stets nur eine einfache Lichtempfindung aus. Sie müssen also notwendig vereinigt werden, wie an vielen Stellen des Buches betont wird, während andererseits doch auch disparate Bilder korrespondierender Empfindungskreise vereinigt werden können. Auch bei Hering scheint mir dieser Satz mehr eine Folge einer polemischen Stimmung gegen vielleicht zu eingreifende Gegner der Identitätstheorie zu sein, als ein notwendiges Erfordernis der Theorie. Er könnte, soviel ich sehe, ohne Schaden für den Zusammenhang beseitigt werden, indem man dafür setzte, daß Bilder von ähnlichen Konturen und ähnlicher Färbung desto leichter verschmelzen, je näher sie identischen Stellen kommen.

Für dieses Einfachsehen mit disparaten Netzhautstellen nimmt nun Herr Hering nicht wie Herr Panum einen organischen Grund an, sondern einen psychischen, indem er sich darauf stützt, daß zur Trennung zusammengesetzter Empfindungen Übung und eine gewisse Schulung der Aufmerksamkeit notwendig sei, ein Satz, der durchaus richtig ist und eine viel größere Zahl von den anscheinenden Widersprüchen in den Erscheinungen dieses Gebietes zu erklären imstande ist, als Herr Hering daraus erklärt. Namentlich tritt für seine Theorie hier folgende Schwierigkeit ein. Wenn *a* und *α* korrespondierende Netzhautstellen sind, *b* eine dem *a* benachbarte in demselben Auge wie *a*, und gleiche Bilder auf *b* und *α* entworfen werden, so verschmelzen sie nach Herrn Herings Meinung, weil sie in Qualität gleich, im Richtungsgefühl sehr ähnlich und nur in Tiefengefühlen erheblich verschieden sind, und weil wir uns nicht die Zeit nehmen, diese Bilder getrennt zu betrachten, sondern, wenn wir auf sie aufmerksam werden, zur Fixation beider forteilen — was seiner Meinung zufolge freilich durch eine Art von Reflexbewegung geschehen soll —, und sie dann einfach sehen. Nun frage ich, warum unterscheiden wir denn aber so sehr viel eher und leichter, wenn zwei gleichartige Bilder auf die Netzhautstellen *a* und *b* fallen. Diese sind dann nämlich nicht bloß qualitativ gleich und haben in den Richtungsgefühlen denselben kleinen Unterschied, wie *b* und *α*, sondern sie haben auch einen ebenso kleinen Unterschied im Tiefengefühl, während *b* und *α* in diesem einen sehr großen Unterschied darbieten. Aus Herrn Herings Darstellung würde also folgen, daß die Empfindungen *a* und *b* noch sehr viel leichter verschmelzen müßten, als die von *α* und *b*, was aber der Erfahrung

geradezu widerspricht. Herr Hering kann nun darauf antworten, daß wenn wir *a* oder *b* zu fixieren suchen, nur eins fixiert werden kann, und daß wir daher gelernt haben *a* und *b* zu unterscheiden, nicht aber *α* und *b*. Damit würde er aber ganz auf dem Standpunkte der empiristischen Theorie angekommen sein, wonach wir die Empfindungen der Lokalzeichen zu unterscheiden und zu deuten lernen müssen.

Und gerade diese Gelegenheit, wo Herr Hering selbst gezwungen ist, in der psychischen Theorie Lösung der Schwierigkeiten zu suchen, die seine Ansicht hervorruft, benutzt er um gegen Volkmanns und anderer psychologische Erklärungen zu polemisieren. Volkmanns Fehler, wenn man es so nennen will, ist dabei aber im wesentlichen nur der, daß er die psychischen Prozesse, auf die es hier ankommt, mit denjenigen Benennungen belegt hat, die wir ihnen geben, wenn sie in das Selbstbewußtsein erhoben werden. Zum Teil haben wir gar keine anderen bezeichnenden Benennungen als diese, weil wir Vorgänge nur benennen können, sofern wir von ihnen wissen. Wenn also diejenigen Vorgänge dieser Art, von denen wir nur aus ihren Resultaten wissen, als unbewußte Seelenvorgänge bezeichnet werden, so hat dies seinen guten Sinn und ist eben die einzige Bezeichnung, die wir dafür haben, wenn wir nicht bei jeder Gelegenheit weitläufige Umschreibungen machen wollen.

Bei der binokularen Verschmelzung zweier Eindrücke erhält nun nach Hering die Gesamtempfindung den mittleren Wert des Richtungsgefühls sowohl als des Tiefengefühls. Da die Tiefengefühle identischer Stellen gleich groß sind, aber von entgegengesetztem Zeichen, so wird der Mittelwert des Tiefengefühls bei Verschmelzung identischer Eindrücke gleich Null. Bei gleichseitigen Doppelbildern fällt, wie leicht zu sehen ist, der Mittelwert des Tiefengefühls positiv aus, das Objekt erscheint entfernter, bei ungleichseitigen Doppelbildern ist der Mittelwert negativ, das Objekt erscheint näher, als die identisch abgebildeten Objekte.

Wenn jeder Netzhauteindruck sich notwendig mit dem der korrespondierenden Stelle der anderen Netzhaut stets in gleicher Stärke vereinigen müßte, so würde der mittlere Tiefenwert dieser Vereinigung immer gleich Null sein. Nur dadurch daß im Wettstreite der Eindruck desjenigen Sehfeldes, welches die Kontur trägt, die Empfindung des anderen unterdrückt, wird der Tiefenwert der Kontur frei und kann mit seinem eigentümlichen Werte in die Vereinigung mit der entsprechenden Kontur im anderen Sehfelde eintreten. Auch dieser Erklärung widersprechen die oben gegebenen Modifikationen des Wheatstoneschen Versuches, bei denen unähnliche Konturen, die sich nicht vereinigen, auf Deckstellen liegen und selbst beim Lichte des elektrischen Funkens sich jede von beiden im stereoskopischen Bilde mit ihrem Tiefenwerte geltend macht, zum Zeichen, daß keine von ihnen im Wettstreite untergeht.

Auf diese Annahme baut nun Herr Hering seine Raumkonstruktion. Er nimmt an, alle Bildpunkte, die den Tiefenwert Null haben, erscheinen durch einen unmittelbaren Akt der Empfindung in einer Ebene, der Kernfläche des Sehraums. Denken wir uns in dieser den Punkt, welcher den beiden Netzhautzentren entspricht, als Anfangspunkt eines rechtwinkeligen Koordinatensystems, die den Tiefenwerten entsprechenden Koordinaten senkrecht zur Kernfläche, so würden die drei Koordinaten jedes gesehenen Punktes proportional sein den Höhenwerten, Breitenwerten, Tiefenwerten des zu dem binokularen Eindrucke gehörigen Raumgefühls, und es wäre nach Hering in dieser Weise

eine Verteilung der gesehenen Punkte im Sehraum gegeben, die wenigstens in der Anordnungsweise der Punkte der wirklichen Anordnung derselben entspräche, wenn auch die Verhältnisse der einzelnen linearen Distanzen nun noch vielfach nach der Erfahrung zu korrigieren wären. Da auch die Körperteile des Beobachters mit in diesem so ausgefüllten Sehraume erscheinen, so wird dadurch auch die räumliche Beziehung der gesehenen Objekte zum Beobachter zugleich mit zur Anschauung gebracht.

Das sind die wesentlichen Grundzüge der Theorie von Hering. Die älteren nativistischen Theorien des Sehens hatten nur die Verteilung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde für angeboren, die Wahrnehmung der Tiefendimensionen dagegen für einen Akt des Urteils gehalten. Panum hatte zuerst die Hypothese aufgestellt, aber nicht in bestimmterer Form ausgeführt, daß die binokulare Parallaxe eine unmittelbare Empfindung der Tiefenverhältnisse geben könnte. Dies hat Herr Hering in der beschriebenen Weise bestimmter auszuführen gesucht und dadurch der nativistischen Theorie ein noch weiteres Feld eingeräumt, als ihr bisher gegeben war. Das von ihm aufgestellte System verrät einen klar und konsequent denkenden Kopf, es berücksichtigt die bisher bekannt gewesenen Tatsachen vollständig und auch einige wichtige neue, die Herr Hering selbst hinzugefügt hat, und kann deshalb, wie ich glaube, als ein gutes Spezimen dieser Klasse von Theorien angesehen werden, weshalb ich mir erlaube, meine Kritik speziell gegen die Theorie von Herrn Hering zu richten.

Der erste Einwand, den ich zu machen hätte und der mir für mein Denken allerdings als ganz unübersteiglich erscheint, ist der, daß ich mir nicht vorstellen kann, wie eine einzelne Nervenerregung ohne vorausgegangene Erfahrung eine fertige Raumvorstellung zustande bringen kann. Ich erkenne aber an, daß dieser Einwand vielleicht von zu metaphysischer Natur ist, um auf naturwissenschaftlichem Boden gehört zu werden, und merke ihn deshalb hier nur an für diejenigen Leser, die ihn mit mir teilen. Ich wende mich deshalb sogleich zu den Gegengründen, die dem Bereiche der erfahrungsmäßigen Tatsachen entnommen sind.

Daß die Annahmen der Panum-Heringschen Theorie von der Verschmelzung der beiden Gesichtsfelder den Tatsachen widersprechen, habe ich schon oben erwähnt. Der Annahme, daß die beiderseitigen Eindrücke in eine Empfindung verschmelzen müssen, wobei nur abwechselnd in langsamer Schwankung bald der eine, bald der andere vorherrschen könne, wird widerlegt durch die Möglichkeit, stereoskopischen Glanz wahrzunehmen bei momentaner Beleuchtung. Die Annahme, daß in den Fällen, wo disparate Konturen verschmelzen, die identisch zu ihnen gehörigen Bilder der anderen Netzhaut unterdrückt seien, wird widerlegt durch das Gelingen des Wheatstoneschen Versuchs, wenn er richtig ausgeführt wird, und namentlich durch sein Gelingen bei momentaner Beleuchtung, wobei die Augenbewegungen keinen Einfluß haben können.

Eine weitere Fundamentalhypothese der Heringschen Theorie ist es, daß die Punkte, welche auf identischen Netzhautstellen sich abbilden (oder allgemeiner, die den Tiefenwert Null haben), immer in einer Ebene zu liegen scheinen sollen, daß das Vortreten oder Zurücktreten der binokular gesehenen Objektpunkte vor oder hinter diese Ebene (Kernfläche des Sehraums) nur davon abhängen solle ob sie positive oder negative stereoskopische Parallaxe haben. Ich habe oben

auf S. 266ff. eine Reihe von Versuchen beschrieben, aus denen hervorgeht, daß, auch wenn alle anderweitigen Anhaltspunkte der Tiefenanschauung fehlen, einfache Liniensysteme, welche genau dieselbe binokulare Parallaxe darbieten, stereoskopisch kombiniert, bald als gewölbte, bald als ebene Fläche erscheinen können, je nachdem durch die Querlinien mehr Ähnlichkeit mit den binokularen Bildern eines nahen und mit konvergenten Blicklinien gesehenen Objekts oder denen eines mit parallelen Gesichtslinien gesehenen fernen Objekts entsteht.

Ich habe ferner gezeigt, daß wenn ein System von vertikalen Fäden, die in der Zylinderfläche des Längshoropters liegen, Herrn Hering in einer Ebene zu liegen scheint, was, wie er andeutet, selbst für seine Augen nicht streng richtig ist, dies eine individuelle Eigentümlichkeit seiner Augen ist, die bei keinem der von mir untersuchten Individuen, auch bei mir selbst nicht vorkam, und daß bei den meisten Beobachtern der Irrtum in der Beurteilung der Konvergenz der Augen, der dieser Erscheinung zugrunde zu liegen scheint, viel kleiner ist, als daß der von Herrn Hering behauptete Erfolg zustandekommen könnte.

Eine Hauptschwierigkeit oder, wie mir scheint, Unmöglichkeit der Heringschen Theorie sind die Tiefengefühle. Solange Eindrücke der einen Netzhaut mit korrespondierenden oder disparaten der anderen Netzhaut sich vereinigen, wo es sich nur um die Differenz der Tiefengefühle beider Stellen handelt, tritt, soviel ich sehe, keine wesentliche Schwierigkeit ein, außer den eben angeführten. Wenn aber das Bild einer Netzhaut, ohne zu verschmelzen, für sich stehen bleibt und im Wettstreite mit dem der anderen Netzhaut dominiert, so nimmt Herr Hering an, und muß auch notwendig annehmen, daß das Tiefengefühl des im Wettstreite siegenden Eindrucks ebenfalls unverschmolzen mit dem der korrespondierenden Deckstelle der anderen Netzhaut zur Herrschaft kommt.

Herr Hering[1] glaubt auch einige Versuche anführen zu können, in denen solche monokulare Bilder mit dem ihnen allein zugehörigen Tiefeneindruck zur Erscheinung kämen.

a. Wenn man einen Punkt in der Medianebene fixiert und ein zweiter liegt vor oder hinter dem Fixationspunkte, so erscheint dieser in Doppelbildern, die ebenfalls vor oder hinter dem Fixationspunkte nahe dem wahren Orte ihres Objekts erscheinen. Diese Beobachtung widerspricht der Heringschen Theorie nicht, beweist aber auch nichts für sie, da wir eben hinreichende Übung haben, den Ort eines in nicht zu entfernten, aber erkennbaren Doppelbildern gesehenen Objekts nahehin richtig zu beurteilen. Daß hier die Erfahrung und nicht die Tiefengefühle entscheiden, geht aus den weiteren Versuchen hervor, wo beide in Widerspruch kommen und wo die Erfahrung, wie mir scheint, immer oder wenigstens, wie Herr Hering zugibt, in der Regel siegt.

b. Zwei Kügelchen werden nebeneinander an Fäden aufgehängt, die Sehlinien hinter ihnen gekreuzt, so daß drei Kugeln erscheinen, eine mittlere binokular gesehene, zwei seitliche monokular, die rechte vom linken, die linke vom rechten Auge gesehen. Nach Hering sollen die seitlichen Kügelchen näher als das mittlere erscheinen. Ich habe den Versuch wiederholt und finde seinen Erfolg abhängig von der Kopfhaltung. Ist mein Kopf bei der Fixation der Kügelchen hinten übergebeugt, die Visierebene also unter ihre Primärlage

[1] Beiträge zur Physiologie. 5. Heft. S. 338—342.

geneigt, so erscheint mir der binokular gesehene mittlere Faden mit dem unteren Ende, welches das Kügelchen trägt, genähert, wie oben S. 271 schon erörtert ist, und dann auch das mittlere Kügelchen näher als die seitlichen. Ist der Kopf vorn übergebeugt, so tritt der entgegengesetzte Anschein ein, der dann freilich dem von Herings Theorie geforderten dem Sinne nach entspricht, aber offenbar einen ganz anderen Grund hat. Biegt man den Kopf bald nach vorn, bald nach hinten, so wechselt auch das Kügelchen seine Stellung.

c. Wenn man einen Stecknadelknopf fixiert, und daneben ist ein senkrechter Draht angebracht etwas nach links und etwas näher als die Stecknadel, so erscheint dieser in Doppelbildern, deren rechtes dem linken Auge angehört und einen negativen Tiefenwert haben sollte, das linke gehört dem rechten Auge an und sollte einen positiven Tiefenwert haben. Das rechte müßte also viel näher, das linke viel ferner als die Stecknadel erscheinen. Herr Hering gibt zu, daß eine solche Tiefenanschauung nur außerordentlich schwer und flüchtig gesehen werde, weil, wie er meint, die kleinste Schwankung der Konvergenz das Urteil über den Ort des Objekts berichtige. Um ihm aber nicht Unrecht zu tun, will ich lieber den Erfolg dieses Versuchs mit seinen eigenen Worten beschreiben: „Ich sehe zunächst und überhaupt immer dann, wenn meine Augen sich irgendwie, wenn auch nur sehr wenig bewegen, die beiden Trugbilder des näheren Drahtes zwar gesondert, aber beide näher als die fixierte einfach erscheinende Stecknadel. Fixiere ich aber anhaltend und fest und konzentriere meine ganze Aufmerksamkeit möglichst auf die fixierte Stecknadel, so tritt das eine, dem linken Auge angehörige Trugbild plötzlich hinter die Stecknadel und erscheint mit solcher Energie jenseits derselben, daß ich diesen Eindruck durchaus dem zwingenden Eindrucke vergleichen muß, mit welchem Stereoskopenbilder sich plötzlich in die Tiefe ausbreiten. Die Erscheinung tritt gerade dann am sichersten ein, wenn ich am wenigsten daran denke. Die geringste Schwankung des Blicks aber, oder nur der Gedanke an das zweite näher erscheinende Trugbild versetzt das andere sogleich wieder vor die Kernfläche: denn es tritt dann die Beziehung beider Bilder auf ein und dasselbe Objekt ein und stört den rein sinnlichen Eindruck. Aber auch ganz von selbst schwindet die Erscheinung, sobald das Trugbild infolge der Ruhe des Auges in eine ungünstige Phase des Wettstreits eintritt, wie dies oben erörtert wurde. Daher denn mancherlei sich vereinigt, um den Versuch zu stören. Überhaupt kann ich ihn nur denjenigen empfehlen, die große Übung im indirekten Sehen haben und wirklich fest fixieren können, nicht bloß es zu können glauben. Man lernt das feinste Doppelsehen nicht in einem Jahre, auch nicht in zweien."

Einige Seiten vorher bemerkt Herr Hering hierher gehörig noch, indem er die Störungen der Empfindung bei diesen Versuchen beschreibt: „Hierzu kommt nun noch, daß bei irgend ausgedehnten Trugbildern der Wettstreit nicht immer in allen Teilen des Trugbildes gleiche Phasen zeigt, daß vielmehr das Trugbild stückweise Sieger und Besiegter im Wettstreite ist, wodurch eine sichere und feste Lokalisation ganz unmöglich wird. Drängen sich auf diese Weise Stücke des auf der betreffenden Deckstelle der anderen Netzhaut liegenden Bildes mit ihren entgegengesetzten Tiefenwerten in das Trugbild derart hinein, daß sie gleichsam Bestandteile desselben werden, so kann die Lokalisation sogar entgegengesetzt der *a priori* zu erwartenden ausfallen."

Diesem letzteren Teile der Beschreibung entspricht nun vollkommen das, was ich selbst bei einer möglichst sorgfältigen und gewissenhaften Anstellung des Versuchs gesehen habe. Ich habe so fest und so lange die Stecknadel fixiert, daß mir schließlich die negativen Nachbilder alles auslöschten. Ich habe gesehen, daß zu der Zeit, wo nur noch einzelne Teile der Doppelbilder des Drahtes im Wettstreit mit dem korrespondierenden Grunde und mit den Nachbildern zeitweilig nebelhaft auftauchen, sie bald fern, bald nah erscheinen, das eine ebenso oft und ebenso energisch wie das andere; aber ich habe mich nicht überzeugen können, daß dies überwiegend in dem Sinne der Heringschen Theorie geschieht, und würde es nie unternommen haben, aus einer an solchen halb erlöschenden Bildern gemachten Beobachtung das Fundament für eine neue Theorie des Sehens zu machen. Indessen gebe ich zu, daß ich ungeschickt gewesen sein mag; nur wird Herr Hering entschuldigen müssen, wenn ich durch diesen ihm selber so „zwingenden Beweis für die Richtigkeit der Theorie“ mich nicht für überzeugt erklären kann.

d. Panums Versuche über die stereoskopische Vereinigung zweier senkrechter Linien im einen Felde mit einer im anderen finden leicht ihre Erklärung, wie oben S. 366 schon bemerkt ist. Ein solches Bild ist der richtige optische Ausdruck eines Linienpaares im Raume, von denen eine für das eine Auge die andere deckt.

e. Wenn man nur ein Auge öffnet und mit dem anderen allein irgendeine zur Antlitzfläche senkrechte Ebene betrachtet, so müßte die schläfenwärts gekehrte Seite derselben positive Tiefenwerte haben, die nasenwärts gekehrte negative, die Ebene sollte deshalb stark gegen die Gesichtslinie geneigt erscheinen. Daß sie es nicht tut, erklärt Herr Hering dadurch, daß wir der Erfahrung zuliebe, die uns lehrt, wie die gesehene Ebene gegen unseren Körper liegt, die Kernfläche des Sehraums in unserer Anschauung eine Achtelswendung machen lassen, wodurch die richtige Lage der gesehenen Fläche wieder hergestellt werde.

Wir können den Versuch aber so modifizieren, daß diese Ausflucht abgeschnitten ist. Man nehme vor die Mitte des Gesichts einen schwarzen Papierstreifen, dessen Breite der Distanz der Augen voneinander gleichkommt. Dann sieht das rechte Auge nur die rechte Hälfte der vorliegenden Objekte, das linke nur die linke Hälfte. Das ganze Gesichtsfeld bis auf einen kleinen im Zerstreuungskreise der beiden Ränder des Papierstreifens liegenden mittleren Streifen wird monokular gesehen. Ein nennenswerter Wettstreit zwischen dem Schwarz des Papiers und den hellen Bildern des Zimmers tritt bei hin und wieder wechselnder Richtung des Blicks nicht ein; keinerlei Augenbewegungen sind imstande, das Urteil über die wahre Entfernung der gesehenen Objekte zu unterstützen. Eine Achtelswendung der Kernfläche würde in diesem Falle die Schwierigkeit ebenfalls nicht heben. Alle Bedingungen also bei diesem Versuche scheinen mir dazu angetan, die von Herrn Hering supponierten Tiefengefühle rein zu Erscheinung kommen zu lassen, und man sollte erwarten nun die beiden Teile der Wand an der Stelle, wo die Grenze der beiden Sehfelder liegt, sich unter einem ziemlich kleinen spitzen Winkel (der Heringschen Theorie zufolge müßte dieser Winkel dem Konvergenzwinkel der Augen gleich sein) zusammenstoßen zu sehen, wie eine Messerschneide, die gegen den Beobachter gekehrt ist. Davon ist aber keine Spur zu sehen, die Wand erscheint ganz flach, gerade so, wie sie mit beiden Augen gesehen erscheint.

Die anderen Täuschungen aber, die von der Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane, der etwa vorhandenen Raddrehungsdifferenz beider Augen und so weiter abhängen, sind bei diesem Versuche alle deutlich zu sehen. Soll nun die Erfahrung, daß die Wand eben ist, die eine täuschende Empfindung beseitigen? Warum beseitigt dann die andere Erfahrung, daß die horizontalen Linien der Wand alle gerade, ihre vertikalen alle parallel sind, welche ich noch bis zu dem Augenblick, wo ich den Papierschirm vorschiebe, machen und fortsetzen kann, nicht auch die von der Raddrehung und der Abweichung der Meridiane abhängigen Täuschungen?

Auch selbst in Fällen, wo die Konturen der gesehenen Bilder vollkommen denen eines objektiven Gegenstandes entsprechen, und also die Tiefengefühle mit den mittels der Augenbewegungen zu machenden Beobachtungen sich in vollkommener Übereinstimmung befinden, wie bei den pseudoskopischen Versuchen, kommen Tiefenwahrnehmungen nicht zustande, wenn die Schlagschatten widersprechen; und der Zusammenhang der Körperform mit dem Schlagschatten ist doch gewiß ein Erfahrungsmoment. Und selbst, wenn die Schlagschatten nicht widersprechen, sondern nur die Erinnerung an die vorher gesehene wahre Form des pseudoskopisch betrachteten Körpers, sind viele Leute, die auf die binokulare Parallaxe vielleicht wenig zu achten gewöhnt sind, gar nicht, manche erst nach längerer Betrachtung bei wechselnder Blickrichtung imstande, den pseudoskopischen Eindruck zu erhalten.

Aus allen diesen Tatsachen folgt, daß die HERINGschen Tiefengefühle nur wirken, wenn auch die durch die Erfahrung gegebenen Momente eine Tiefenwahrnehmung fordern, daß sie spurlos verschwinden, sobald die erfahrungsmäßige Auslegung der Gesichtserscheinungen, oder auch nur die Erinnerung an die Form des individuellen Objekts widerspricht. Muß man daraus nicht schließen, daß jene Tiefengefühle, wenn sie überhaupt existieren, mindestens so schwach und undeutlich sind, daß sie gar keinen nennenswerten Einfluß den aus der Erfahrung genommenen Momenten gegenüber ausüben können, und daß daher die Tiefenanschauung *ohne* sie ganz ebensogut zustande kommen muß als *mit* ihnen, beziehlich *wider* sie, wie es nach HERINGS Annahmen geschehen soll?

Schließlich führt uns dies auf eine letzte wesentliche Schwierigkeit, der noch keine nativistische Theorie der Raumanschauung entgangen ist, wenn sie sich nicht ganz auf allgemeine Andeutungen beschränkte. Es muß nämlich in diesen Theorien immer vorausgesetzt werden, daß wirklich vorhandene *Empfindungen* durch eine Erfahrung, die sie als unbegründet nachweist, aufgehoben werden können. Dafür ist aber nicht ein einziges wohl konstatiertes Beispiel da. Bei allen Sinnestäuschungen, welche durch anomal erregte Empfindungen hervorgerufen werden, wird die täuschende Empfindung nie beseitigt durch die widersprechende bessere Erkenntnis des Objekts und durch die Einsicht in die Ursache der Täuschung. Die Druckbilder, die feurigen Garben am Sehnerveneintritt, die Nachbilder usw. bleiben an ihrem scheinbaren Orte im Gesichtsfelde bestehen, ebensogut wie das von einem Spiegel entworfene Bild scheinbar hinter dem Spiegel fortfährt gesehen zu werden, obgleich wir von allen diesen Erscheinungen sehr wohl wissen, daß ihnen keine reelle Existenz zukommt. Es kann allerdings die Aufmerksamkeit abgelenkt sein und bleiben von Empfindungen, die zu den Objekten der Außenwelt in gar keiner Beziehung stehen, wie z. B. von den Empfindungen der schwächeren

Nachbilder, der entoptischen Objekte und anderen. Es können ferner mäßig große Irrtümer in der Schätzung ihrer Intensität durch Kontrast eintreten, oder wenn sie als gemeinschaftliche Wirkung zweier Objekte angeschaut werden, können sie falsch an die beiden Objekte verteilt werden, wie das bei den Kontrasterscheinungen vorkommt. Einer der Haupteinwürfe gegen die früheren Formen der empiristischen Theorie ist es ja immer gewesen, solange man bewußte Schlüsse und Induktionsschlüsse noch nicht genügend unterschied, daß die Sinnestäuschungen durch die Einsicht in ihren Mechanismus und durch die entgegenstehende Erfahrung nicht aufgehoben werden. Was sollte aus unseren Sinneswahrnehmungen werden, wenn wir die Fähigkeit hätten, einen Teil derselben, der uns gerade nicht in den Zusammenhang unserer Erfahrungen paßte, nicht nur nicht zu beachten, sondern in sein Gegenteil zu verkehren?

Denken wir z. B. an den Fall zweier seitlich von der Medianebene liegenden Doppelbilder ein und desselben Objekts. Das eine löst nach Herings Theorie eine positive Tiefenempfindung aus, das andere eine negative, und zwar nicht etwa eine von geringer Größe, sondern wie es seine Theorie der stereoskopischen Phänomene voraussetzt, von sehr beträchtlicher und sehr deutlich erkennbarer Größe. Aber weil wir wissen, daß die Doppelbilder zueinander gehören und Bilder *eines* Objekts in einer uns mehr oder weniger gut bekannten Entfernung sind, sollen wir den Unterschied ihrer Tiefenempfindungen gewöhnlich nicht erkennen, selbst wenn wir darauf achten, ob das eine oder das andere etwa uns näher oder ferner erscheine. Nun erzeuge man einmal einen schwachen Farbenunterschied beider Bilder, indem man ein Auge vorher gegen eine Farbe ermüdet oder es von der Seite her beleuchtet, so haben wir einen wirklichen Unterschied der Empfindung beider Doppelbilder. Aber dieser Unterschied tritt hervor, auch wenn er zu den allerschwächsten gehört, und ohne Hilfe des binokularen Kontrastes vielleicht gar nicht wahrnehmbar ist, trotzdem wir wohl wissen, daß die beiden Bilder Bilder desselben Objekts sind und also gleiche Farbe haben müssen, und trotzdem die Färbung keine objektive, sondern eine subjektive ist, und wir dies ebenfalls wissen.

Dann betrachte man das ganze System der Lokalisation, wie sie nach Hering durch unmittelbare *Raumempfindung* ursprünglich gegeben ist. Nach allen kleineren Verbesserungen, die man etwa noch daran anbringen könnte, um es der Wirklichkeit genauer anzupassen, würde es immer nur so viel leisten können, daß es eine richtige Lokalisation der Objekte für eine einzige Stellung der Blicklinien gäbe. In allen unendlich vielen anderen Fällen würde es mehr oder weniger falsch und durch Erfahrung zu verbessern sein. Die hypothetischen Annahmen von Hering machen also — vielleicht — die Erklärung der Gesichtswahrnehmungen in einem einzelnen Falle leichter, um sie in allen anderen desto schwieriger zu machen; und jedenfalls muß man schließen: Wenn die der Erfahrung entnommenen Momente imstande sind, die richtige Erkenntnis der räumlichen Verhältnisse selbst entgegenstehenden direkten Raumempfindungen gegenüber herzustellen, so müssen sie noch viel eher und leichter imstande sein, dieselben richtig erkennen zu machen, wenn keine solche Hindernisse zu überwältigen sind[1].

[1] Ich wünsche, daß man diese Kritik, die ich im Interesse der Sache gegen Herrn E. Herings Ansichten zu richten gezwungen war, nicht als einen Ausdruck persönlicher Gereiztheit wegen der Angriffe ansehen möge, die er gegen meine letzten Arbeiten gerichtet

Sobald wir dagegen alle Anschauung der Raumverhältnisse auf Erfahrung zurückführen, wie dies in der empiristischen Theorie geschieht, so kämpft in den Sinnestäuschungen niemals Empfindung gegen Erfahrung, sondern nur die eine Induktion, welche unter gewissen beschränkten Bedingungen gewonnen ist, gegen die andere, die unter anderen Bedingungen gewonnen ist. Wir haben es dann mit einem Kampfe gleichartiger Mächte zu tun und verstehen, daß bald die eine Seite, bald die andere, je nach den veränderten Umständen, oder auch beide wechselnd unter gleich bleibenden Umständen unterliegen können.

Ich erkenne aber durchaus an, daß die hier diskutierten Fragen noch nicht vollkommen spruchreif sind. Ich habe meinen eigenen Standpunkt teils wegen der Einfachheit der Erklärungen, die sich aus ihm ergeben, so gewählt, teils aber auch besonders aus methodologischen Rücksichten, indem ich es nämlich stets für ratsam halte, die Erklärungen der Naturprozesse auf die möglichst geringste Zahl und auf möglichst bestimmt gefaßte Hypothesen zu bauen. Andererseits aber muß ich doch auch sagen, daß, je mehr ich im Fortgang dieser Untersuchungen, die mich einen guten Teil meines Lebens hindurch beschäftigt haben, lernte meine Augenbewegungen und meine Aufmerksamkeit mit freiem Willen zu beherrschen, es mir desto unzulässiger erschien, die wesentlichen Phänomene dieses Gebiets aus einem vorher schon gegebenen Nervenmechanismus erklären zu wollen.

Was die Unterschiede meiner hier gegebenen Darstellung, deren wesentliches ich schon in einer populären Vorlesung im Jahre 1855 veröffentlicht habe, von anderen neueren Arbeiten betrifft, die auf der Grundlage einer empiristischen Theorie des Sehens fußen, so habe ich für die Abmessung der räumlichen Verhältnisse des Sehfeldes sowohl, als der Entfernung der gesehenen Objekte weniger Nachdruck auf die Muskelgefühle gelegt, als Wundt, weil ich dieselben aus den oben angeführten Gründen glaube für ziemlich ungenau und veränderlich halten zu müssen. Ich habe vielmehr die hauptsächlichsten Abmessungen des Sehfeldes aus der Deckung verschiedener Bilder mit denselben Netzhautteilen hergeleitet. Wundt hat namentlich die hierher gehörigen psychischen Phänomene einer ausführlichen und sehr dankenswerten Bearbeitung unterworfen. Einzelne Beobachtungen, in denen ich von ihm abweiche, sind oben notiert.

A. Nagel erklärt die Entstehung der binokularen Doppelbilder aus der Annahme, daß beide Augen ihre Netzhautbilder auf zwei verschiedene Kugelflächen nach außen projizierten. Der Mittelpunkt dieser Kugelflächen wird im Kreuzungspunkt der Visierlinien des entsprechenden Auges angenommen, und beide Kugelflächen sollen sich im Fixationspunkte schneiden. Dabei muß also eigentlich jeder Punkt, der nicht in der Schnittlinie beider Kugeln liegt, in Doppelbildern erscheinen. Diese Projektionen denkt sich Nagel nun von dem Halbierungspunkt der Verbindungslinie beider Augenmittelpunkte aus angesehen, und je nachdem sich dabei die Doppelbilder decken, oder gekreuzt, oder gleichseitig nebeneinander liegend erscheinen, sollen sie es auch im Gesichtsfelde tun.

hat. Ich glaube, daß der Standpunkt einer nativistischen Theorie des Sehens, auf den sich Herr Hering gestellt hat, einen konsequent denkenden Kopf ziemlich notwendig zu der Art von Hypothesen führen mußte, welche seiner Theorie zugrunde liegen; und ich habe die Angriffe speziell gegen seine Ansichten gerichtet, weil sie mir die klarste und konsequenteste Durchführung der nativistischen Theorie zu enthalten schienen, die zurzeit noch möglich ist. Die Einwürfe, welche Herr Hering gegen meine Arbeiten gemacht hat, habe ich im Laufe dieser letzten Abteilung zu beantworten gesucht, soweit sie sachliches Interesse haben. Die, welche nur persönliches Interesse haben, habe ich vorgezogen unerwähnt zu lassen, außer, wo ich anerkennen mußte, daß Herr Hering Recht gehabt hat.

NAGELS Theorie kommt zwar der Wahrheit schon ziemlich nahe; aber einmal ist sie etwas künstlich, da sie eine doppelte Projektion voraussetzt, zweitens fehlt in Wirklichkeit die Anschauung einer verschiedenen Entfernung der beiden Doppelbilder, welche NAGELS Theorie in den meisten Fällen fordert; endlich würde ihr zufolge die Lage der einfach gesehenen Bilder nicht immer genau mit der Wirklichkeit stimmen. Übrigens ist dies wohl der einzige wesentliche Punkt, in welchem meine oben gegebene Theorie von der NAGELS abweicht.

Die richtige Theorie der Doppelbilder und ihrer Lage wurde dagegen von A. CLASSEN gegeben, wenn auch dabei mit Unrecht die faktische Richtigkeit der von HERING angegebenen Phänomene, welche sich auf das scheinbare Zentrum der Richtungslinien mitten zwischen beiden Augen beziehen, geleugnet ist. Ich selbst bin zwar, ebenso wenig wie Herr CLASSEN, geneigt, diese Erscheinung zur Grundlage aller unserer Lokalisationen zu machen, und halte sie nur für eine nebenher gehende Sinnestäuschung, die bei mir selbst auch für das rechte und linke Auge in verschiedenem Grade stattfindet und durch geschärftere Aufmerksamkeit überwunden werden kann; aber es ist eine Täuschung, die wirklich besteht.

Eine wesentlichere Abweichung zwischen der von mir gegebenen Darstellung der Theorie und CLASSENS ist, daß er den Ortssinn der Netzhaut und die Projektion in das Sehfeld als ursprünglich gegeben und nicht erworben betrachtet. Wenn aber die Lage der einzelnen Netzhautpunkte zueinander durch eine angeborene Empfindung gegeben ist, dann ist auch die Identität korrespondierender Punkte angeboren, da deren gleiche Lage gegen den Blickpunkt dann ebenfalls ursprünglich in der Empfindung gegeben sein muß. Es hat diese Abweichung indessen auf die Darstellung derjenigen Kapitel des Sehens, die CLASSEN ausführlich behandelt, namentlich die Lehre vom Muskelsinn und vom Binokularsehen, keinen Einfluß, und es finden sich bei ihm eine große Menge interessanter Erläuterungen aus der pathologischen Beobachtung für die vorgetragenen physiologischen Lehren.

Die der empiristischen Theorie sich anschließenden Ansichten von H. MEYER, DONDERS, VOLKMANN, A. FICK, einzelne Teile der Theorie betreffend, sind jede an ihrer Stelle erwähnt worden.

Darstellungen der empiristischen Theorie.

1855. HELMHOLTZ, Über das Sehen des Menschen. Ein populär wissenschaftlicher Vortrag, gehalten zu Königsberg i. Pr., zum Besten von KANTS Denkmal. Leipzig, L. Voss.

1861. A. NAGEL, Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig und Heidelberg.

1862. W. WUNDT, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg.

1863. A. CLASSEN, Das Schlußverfahren des Sehaktes. Rostock.

1864. A. FICK, Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Sinnesorgane. Lahr. Heft 2.

— W. WUNDT, Vorlesungen über Menschen- und Tierseele. Leipzig, L. Voss. Zwei Bände.

Nachtrag zu § 27. Die Augenbewegungen.

Für die Theorie der Augenbewegungen möchte ich hier nachträglich noch einen vielleicht nicht ganz unwichtigen Umstand erwähnen. Die Befestigung des Auges an der Konjunktiva und selbst in dem Bindegewebe und Fettpolster der Augenhöhle ist eine solche, daß eine Verschiebung nach dem LISTINGschen Gesetz verhältnismäßig die geringste Spannung dieser Teile hervorbringen wird. Jede stärkere Raddrehung des Auges, die vom LISTINGschen Gesetze abwiche, würde notwendig eine Zerrung und teilweise Faltung einelner Streifen der Kon-

junktiva hervorbringen müssen. So würde auch von dieser Seite her die Bewegung nach dem LISTINGschen Gesetze als die mit der geringsten Anstrengung und Unbequemlichkeit verbundene erscheinen, wie dies FICK und WUNDT für die Muskeln geschlossen haben.

Zusatz zu Seite 90. Die stereographische Projektion der Punkte einer Kugel in eine Ebene gibt noch ein bequemes Mittel ab, durch einfache Linienkonstruktion die Größe der Raddrehungen des Auges sowohl anschaulich, als auch meßbar zu machen, im Fall man weitläufige Rechnungen vermeiden will.

Es seien also die Punkte des Blickfeldes stereographisch in eine Ebene eingetragen. Hat man, wie FICK, MEISSNER, WUNDT, die als *Longitudo* und *Latitudo* bezeichneten Winkel für die Messung gebraucht, so kann man für die Eintragung in das Gesichtsfeld ein Linienschema gebrauchen, wie das der Meridiane und Parallelkreise auf einer Karte der östlichen oder westlichen Erdhemisphäre. Die Meridiane messen FICKs *Longitudo* (l der Gleichungen 4e) und 4f) S. 72), die Parallelkreise seine *Latitudo* (m derselben Gleichungen). Die Meridiane einer solchen Hemisphärenkarte sind bekanntlich Kreisbögen, welche durch beide Pole gehen und den geradlinigen Äquator schneiden in einer Entfernung vom Mittelpunkte, welche gleich $R \operatorname{tang}\left(\frac{1}{2}\, l\right)$ ist, wenn R den Radius des Umfanges der Karte bezeichnet. Die Parallelkreise schneiden die Peripherie an Punkten, deren Bogenentfernung von den Enden des Äquators gleich m ist, und den vertikalen Durchmesser des Kreises in einer Entfernung, welche gleich $R \operatorname{tang}\left(\frac{1}{2}\, m\right)$ ist. Nach diesen Angaben können alle diese Kreise konstruiert werden.

Benutzt man die Erhebungswinkel λ und die Seitenwendungswinkel μ, so muß man die beiden Pole nach rechts und links legen, den Äquator vertikal. Auch dann messen die Meridiane den Winkel λ, die Parallelkreise den Winkel μ.

Hat man, wie VOLKMANN die Lage der Punkte nach Meridianen des Blickfeldes und nach ihrem Winkelabstand vom Pole des Blickfeldes bestimmt, so muß man Liniennetze gebrauchen, ähnlich denen der polaren Hemisphärenkarten. Die Meridiane des Blickfeldes sind dann gerade Linien, die durch den Mittelpunkt des Kreises gehen und dieselben Winkel miteinander machen, wie jene Meridiane. Der Bogen α, vom Pol aus gemessen, ist auf ihnen durch die Länge $R \operatorname{tang}\left(\frac{1}{2}\alpha\right)$ darzustellen.

In Fig. 76 a. f. S. stelle der Kreis $afbg$ den Umfang des halbkugelförmigen Blickfeldes in stereographischer Projektion dar; c sei sein Mittelpunkt und der Anfangspunkt für die Winkelmessungen, h der Punkt, für den die Raddrehung des Auges zu bestimmen sei. Wir unterscheiden zwei Fälle:

1. Der Mittelpunkt c entspricht der Primärlage des Auges.

Konstruktion. Fälle ein Lot hi von h auf die Horizontallinie ab und verlängere es bis zum Punkte i, der ebensoweit von ab entfernt ist, wie h. Ziehe hf und if. Der Winkel hfi ist dann gleich dem Winkel, um den der vertikale Meridian des Auges gegen die Vertikallinie gedreht ist. Dies ist der Winkel k' der Gleichungen 4e) und 4f) S. 72.

Beweis. Wenn c die Primärlage des Auges ist, und der Blick von c nach h längs der geraden Linie ch (die einen Meridian des Blickfeldes darstellt bewegt wird, so verschiebt sich ch nach dem LISTINGschen Gesetze in sich

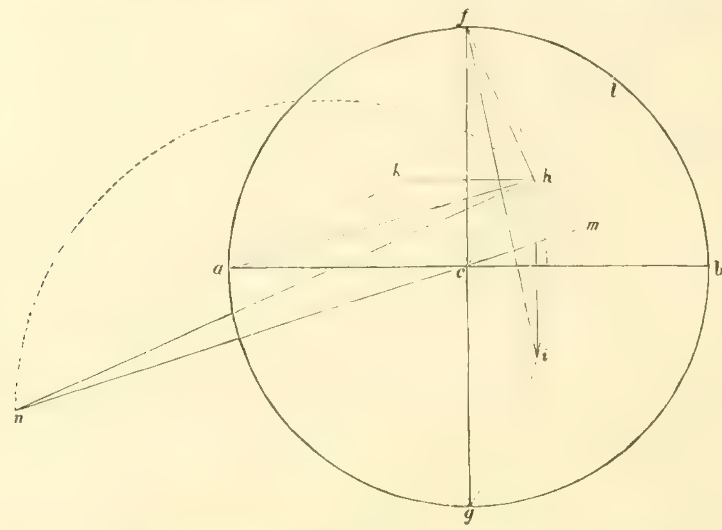


Fig. 76.

selbst. Da nun gleiche Flächenwinkel in den stereographischen Projektionen immer durch gleiche ebene Winkel dargestellt sind, so muß ein vertikales Linienelement des Sehfeldes, welches den Blickpunkt c schneidet, beim Blicke nach h denselben Winkel mit der Linie cl machen, wie vorher, d. h. wieder vertikal gerichtet sein. Dagegen eine durch das Auge und h gehende absolut vertikale Ebene schneidet das Blickfeld in dem durch den Bogen $fhig$ dargestellten größten Kreise. Der Winkel zwischen dem vertikalen Netzhautmeridian und der durch die Blicklinie gelegten Vertikalebene ist gleich dem Winkel zwischen der Tangente des Kreises $fhig$ in h und der vertikalen Linie hi, welche Sehne des Kreises ist, und dieser Winkel ist wiederum gleich dem Peripheriewinkel über der Sehne hi; ein solcher ist hfi. Denn läßt man die Spitze des Peripheriewinkels über der Sehne hi dem Punkte h unendlich nahe rücken, so wird daraus jener Winkel zwischen der Sehne und der Tangente in h.

Den Winkel hfi kann man konstruieren, ohne den Kreis $fhig$ zu konstruieren; deshalb habe ich ihn in der oben vorgeschriebenen Konstruktion benutzt. Um den Sinn der Drehung zu bezeichnen, bemerke man: es liegt der vertikale Meridian der Netzhaut gegen die absolute Vertikale so gedreht, wie die Linie fi gegen fh liegt (in dem Falle der Fig. 76 also rechts herumgedreht).

Konstruktion für die Lage des Netzhauthorizontes. Man fälle von h ein Lot auf den vertikalen Durchmesser fg, verlängere es bis zum Punkte k, der ebensoweit von fg entfernt ist, wie h; ziehe ha und ka, so ist kah der Winkel, den der Netzhauthorizont mit der Visierebene macht, bei der Richtung des Blickes nach h. Und zwar liegt der Netzhauthorizont gegen die Visierebene so gedreht, wie ak gegen ah, d. h. in dem Falle der Fig. 76, links herum.

Beweis, wie vorher.

2. Wenn der Mittelpunkt c nicht der Primärstellung der Blicklinie entspricht.

In diesem Falle kommt zu den Winkeln hfi und hak noch eine Korrektion hinzu, die in folgender Weise durch Konstruktion gefunden werden kann.

Konstruktion. Die Richtung der Primärstellung der Gesichtslinie entspreche dem Punkte m der Projektion. Man ziehe mc und verlängere es bis n so weit, daß

$$nc.mc = ac.ac\,.$$

Dann ist n die Projektion des dem Punkte m im kugeligen Blickfelde diametral gegenüberliegenden Punktes. Man ziehe hn, so ist die Drehung des vertikalen Netzhautmeridians gegen die Vertikale gleich

$$\sphericalangle hfi - 2 \sphericalangle hnm$$

und die Drehung des Netzhauthorizontes gegen die Visierebene gleich

$$- \sphericalangle kah - 2 \sphericalangle hnm$$

Die Winkel subtrahieren sich, wenn ihr zweiter Schenkel gegen den nach h gerichteten Schenkel gleichsinnig gedreht ist; sie addieren sich, wenn die zweiten Schenkel ungleichsinnig gedreht sind.

Beweis. Da m und n diametral gegenüberliegende Punkte sind, so stellen die durch m und n gelegten Kreise, sowie auch die gerade Linie mn, Meridiane des Blickfeldes vor, welche durch die Primärstellung der Blicklinie gehen und sich also in sich selbst verschieben, wenn sie vom Blicke durchlaufen werden. Es sei zuerst der Blick nach c gerichtet und nehme das Nachbild einer vertikalen Linie auf; dieses ist selbst vertikal und fällt in die Linie fg. Jetzt wandere der Blick nach m. Das Nachbild, wo es m schneidet, muß wieder vertikal liegen. Jetzt führe man den Blick von m nach h, längs des größten Kreises, der durch den Bogen mhn dargestellt ist; das Nachbild muß in h mit der Tangente des Kreises denselben Winkel machen, wie die Vertikale mit der Tangente in m. Das Nachbild wird also abgelenkt von seiner vertikalen Richtung um den Winkel, den die Tangenten in m und h miteinander machen, oder um den doppelten Betrag des auf dem Bogen hm stehenden Peripheriewinkels hnm. Um so viel kleiner wird also auch der Winkel zwischen dem Nachbilde und dem vertikalen größten Kreise $fhig$, verglichen mit dem früheren Falle, wo die Primärlage in c war.

Die gleiche Betrachtung gilt für horizontale Nachbilder, die im Netzhauthorizonte liegen.

Zusätze von v. Kries.

I. Über die räumliche Ordnung des Gesehenen, insbesondere ihre Abhängigkeit von angeborenen Einrichtungen und der Erfahrung.

1. Allgemeines über die Natur der Raumvorstellung.

Wie in der Vorrede dieser Neuausgabe des Helmholtzschen Werkes gesagt wurde, besitzen die in den letzten Jahrzehnten gewonnenen Bereicherungen unseres tatsächlichen, die Gesichtswahrnehmungen betreffenden Wissens, wie zahlreich und interessant sie auch sein mögen, doch nirgends eine ganz tiefgreifende Bedeutung, die geeignet wäre, grundlegende theoretische Überzeugungen umzustoßen oder auch nur zu erschüttern. Die klassische Darstellung, die Helmholtz vor mehr als 40 Jahren gab, gründet sich z. T. auf Erwägungen philosophischer Natur, z. T. auf relativ einfache Ergebnisse unmittelbarer Selbstbeobachtung, z. T. freilich auch auf ein umfangreiches empirisches Beobachtungsmaterial im gewöhnlichen Sinne; aber auch in der letzteren Beziehung kann das, was die 1. Auflage der physiologischen Optik enthält, trotz mancher Bereicherung und einzelner Berichtigungen im wesentlichen noch als vollkommen richtig und zutreffend bezeichnet werden. So erscheint denn die Helmholtzsche Darstellung der Gesichtswahrnehmungen als eine auch im gegenwärtigen Zeitpunkt noch durchaus mögliche und zulässige; bei gewisser Veranlagung, Gedankenrichtung und allgemeiner philosophischer Überzeugung könnte ein Autor sich ihr wohl heute noch mit geringen Modifikationen anschließen.

Hiernach könnte es scheinen, als ob wir uns damit begnügen könnten, das, was inzwischen an tatsächlichen Befunden bekannt geworden ist, zusammenzustellen und in passender Weise dem Rahmen der Helmholtzschen Darstellung einzufügen, wie dies in der Hauptsache in den obigen Hinzufügungen geschehen ist. Allein aus mehr als einem Grunde wäre es doch nicht angängig uns hierauf zu beschränken. Vor allem ist es geboten, die Bedeutung, die eine Anzahl in neuerer Zeit ermittelter Tatsachen (anatomische Verhältnisse, das Sehen der Schielenden u. a. betreffend) mit Bezug auf die theoretischen Fragen besitzt, des genaueren darzulegen, um so mehr als diese Bedeutung von anderer Seite meines Erachtens vielfach unzutreffend aufgefaßt worden ist. Wenn ferner auch der ganze Standpunkt, von dem aus Helmholtz seine Gesichts-

wahrnehmungen behandelte, noch jetzt als ein möglicher erscheint, so ist doch nicht zu verkennen, daß teils spezielle Tatsachen, teils gewisse Verschiebungen allgemeiner Auffassungen mit Notwendigkeit auf die Erwägung dieser und jener Modifikationen führen, die die HELMHOLTZsche Lehre, unbeschadet ihres eigentlichen Kerns, wohl erfahren kann. Ja, es sei gleich hier gesagt, daß gewisse auf ganz anderem Gebiete als der physiologischen Optik liegende Eigentümlichkeiten der HELMHOLTZschen Denkweise neben vielfacher Zustimmung auch in großem Umfang Widerspruch hervorgerufen haben, einen Widerspruch, der dann auch einer richtigen Würdigung seiner im engeren Sinne der physiologischen Optik zugehörigen Lehre vielfach hinderlich gewesen ist, und daß daher auch aus diesem Grunde eine Sonderung dieser letzteren von jenen Anschauungen gewünscht werden kann.

So ergab sich denn die Notwendigkeit, das HELMHOLTZsche Werk durch eine neue Darstellung gerade der Fundamentalfragen zu ergänzen, eine Darstellung, bei der selbstverständlich der Herausgeber nur in durchaus unabhängiger Weise seine eigenen Überzeugungen zugrunde legen konnte. Im Interesse der Einheitlichkeit des Werkes wäre selbstverständlich hierzu der der geeignetste gewesen, der durch eigene wissenschaftliche Überzeugungen auf dem hier behandelten Gebiete den von HELMHOLTZ vertretenen Anschauungen am nächsten steht. Ich muß nun hier sogleich das Bekenntnis vorausschicken, daß dies für mich keineswegs uneingeschränkt zutrifft. Vielmehr bin ich schon bei dem ersten Einarbeiten in diese Gegenstände zu Überzeugungen gelangt, die in einigen fundamentalen Beziehungen, insbesondere in betreff der psychologischen Natur der Raumvorstellung von der HELMHOLTZschen Lehre abweichen. Wenn ich trotz dieses die Aufgabe sehr erschwerenden Umstandes eine Neuherausgabe der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen übernommen habe, so bin ich dazu z. T. durch die einfache Tatsache bestimmt worden, daß wohl schwerlich ein Herausgeber zu finden gewesen wäre, der nicht mit ebenso großen Schwierigkeiten sei es derselben sei es anderer Art zu kämpfen gehabt hätte; z. T. aber auch dadurch, daß die Bedeutung jener grundsätzlichen Unterschiede doch in erster Linie auf psychologischem und logischem Gebiete liegt, während sie für die hier in den Vordergrund zu stellenden physiologischen Fragen von geringerem Belang sind.

Es wird jedoch unerläßlich sein, eine kurze Besprechung dieser prinzipiellen Punkte vorauszuschicken; dabei wird sogleich verständlich werden, daß die Ergebnisse, zu denen ich hier gelange, zwar der ganzen Darstellung zugrunde gelegt werden müssen, daß sie aber in bezug auf die im eigentlichen Sinne der physiologischen Optik zugehörigen Fragen nicht präjudizieren, vielmehr in bezug auf sie den verschiedensten Auffassungen Raum lassen.

Der erste hier zu berührende Punkt hängt mit der allgemeinen psychologischen Natur der Raumvorstellung zusammen. Meines Erachtens muß jede Betrachtung dieser Probleme in erster Linie davon ausgehen, daß die Raumvorstellung als solche einen einheitlichen und unveränderlichen Bestandteil unseres Bewußtseins ausmacht. Dies zeigt im Grunde die einfache Tatsache, daß wir bei jeder räumlich geordneten sinnlichen Wahrnehmung das an irgend einem Orte Wahrgenommene von diesem Orte unterscheiden; wir können uns an dem gleichen Orte etwas anderes (oder auch nichts) denken, ohne daß der Raum als solcher irgendeine Veränderung erführe. Es ist dies eben die Tatsache, die KANT im Auge hatte, wenn er sagte:

„Man kann sich niemals eine Vorstellung davon machen, daß kein Raum sei, ob man sich gleich ganz wohl denken kann, daß keine Gegenstände darin angetroffen werden."

Diese Tatsache schließt natürlich nicht aus, daß z. B. unsere optischen Empfindungen niemals anders als in räumlicher Ordnung gegeben sind, daß wir ein nichträumliches Sehen, eine von der Raumanschauung losgelöste Sehempfindung nicht kennen. Sie besagt nur, daß der Raum etwas darstellt, was wir an der optischen Wahrnehmung als ein besonderes und als ein in allem Wechsel des Wahrgenommenen sich konstant Erhaltendes herausheben können.[1]

Unzutreffend dagegen würde die Behauptung sein, daß wir uns auch Raum ohne ein Material an sinnlicher Empfindung nicht vorzustellen vermögen. Richtig ist zwar wohl, daß wir bestimmte räumliche Gebilde, Figuren, Körper, oder wie wir noch allgemeiner sagen können, einzelne Orte nicht vorzustellen vermögen, ohne sie durch eine (wenn auch nur schattenhaft vorgestellte) Empfindungsmodalität vor ihrer Umgebung ausgezeichnet, markiert zu denken, daß also, wenn wir aufgefordert werden, uns ein Dreieck, eine Kugel, einen gerade vor uns gelegenen Punkt vorzustellen, wir uns stets etwas Gesehenes, etwas mit optischen Qualitäten Verknüpftes denken. Hierüber wird um so weniger zu streiten sein, als jenes schattenhafte „Anklingen" der optischen Empfindung selbst etwas psychologisch schwer greifbares und wenig deutliches ist. Gibt man aber auch irgendeine Beteiligung der optischen Empfindungen bei jeder Vorstellung räumlicher Gebilde zu, so wird man um so nachdrücklicher betonen müssen, daß es nur die Heraushebung einzelner Orte ist, die wir in dieser Weise an die optische Empfindung geknüpft finden, nicht aber die Vorstellung des Raumes als solche. Dies macht sich in der entschiedensten Weise darin bemerklich, daß auch bei der gewöhnlichen optischen Wahrnehmung zwar bestimmte Teile des Raumes, als Orte des Gesehenen, jene Verknüpfung mit dem Optisch-Sinnlichen aufweisen, alles übrige aber, vor allem ihre Zwischenräume, einer ähnlichen sinnlichen Bestimmung ermangeln. Sehen wir einen grünen Gegenstand in einer gewissen Entfernung, so kann allerdings für den entfernten Punkt, an dem wir ihn wahrnehmen, zutreffend jene Verknüpfung von Grünempfindung und räumlicher Bestimmung behauptet werden. Aber die ganze zwischen uns und jenem Punkte liegende Erstreckung wird doch gleichfalls vorgestellt und sie entbehrt der optisch-sinnlichen Bestimmungen. Das gleiche gilt für den Abstand zweier neben oder übereinander gelegenen Punkte, die etwa vor einem entfernteren Hintergrunde wahrgenommen werden. Veränderlich ist also am Raum nicht nur das, was am einzelnen Orte gesehen wird, sondern auch das, welche Teile desselben überhaupt durch eine sinnliche

---

[1] Schon im Hinblick auf diese Verhältnisse erscheint es mir auch nicht ratsam, die ganz eigenartige Weise, wie Raum und Zeit in unserem Bewußtsein gegeben sind, mit dem Namen einer Empfindung zu bezeichnen. Den von Kant benutzten Namen der Raumanschauung vermeide ich, weil schon Helmholtz und ähnlich auch zahlreiche neuere Autoren diesen in einem ganz anderen Sinne als Kant gebrauchen, nämlich damit die Gesamtheit einer bestimmten räumlich geordneten Wahrnehmung bezeichnen. Es dürfte sich demgemäß wohl am meisten empfehlen, in dem uns hier beschäftigenden Sinne (für das in allen unseren Wahrnehmungen übereinstimmend Aufweisbare) den Ausdruck der Raumvorstellung zu benutzen, der natürlich auch nicht beansprucht, über die (wie bemerkt durchaus spezifische) Art, mit der der Raum in unserem Bewußtsein gegeben ist, etwas Besonderes auszusagen.

Markierung herausgehoben werden, während der Raum als Gesamtheit immer derselbe bleibt.

Das soeben erwähnte Verhalten führt uns sogleich auf ein weiteres, was noch einer besonderen Aufmerksamkeit bedarf, nämlich die Einheitlichkeit der Raumvorstellung. Ist die Bedeutung des sinnlichen Materials immer die, einen bestimmten Teil des Raumes aus seiner Gesamtheit auszeichnend hervorzuheben, so liegt darin auch schon, daß die Vorstellung eines einzelnen Ortes für sich allein überhaupt etwas völlig Undenkbares ist, und daß der Ort nie anders als im Zusammenhang mit dem Raum als Ganzes gedacht werden kann. Auch dies ist ein Punkt, dessen richtige Erfassung von grundlegender Bedeutung ist. Darin liegt der fundamentale Unterschied des Räumlichen gegenüber allen Empfindungsmannigfaltigkeiten, daß bei diesen das Einzelne etwas für sich denkbares und existenzfähiges ist. Dies gilt für alle (intensiven oder qualitativen) Empfindungsreihen, mag es uns auch noch so geläufig und gewohnt sein, die von ihnen umfaßte Gesamtheit uns als ein Ganzes vorzustellen. Der im Augenblick gehörte Ton mag uns als einer der wohlbekannten, vom tiefsten zum höchsten führenden Tonreihe erscheinen; man wird doch zugeben müssen, daß diese Beziehung der einzelnen Empfindung auf abweichende nicht in derselben Weise als etwas durchaus unerläßliches in sie eingeht, wie die Vorstellung des Ortes auf der Vorstellung einer Umgebung beruht, innerhalb deren er gedacht wird, d. h. auf der Raumvorstellung als solcher.

Erscheint hiernach die Raumvorstellung stets als eine einheitliche, so bedarf dies freilich noch einer gewissen beschränkenden Erläuterung. Selbstverständlich wird niemand behaupten wollen, daß stets der gesamte Raum in seiner unendlichen Erstreckung in allen seinen Teilen überhaupt oder gar in gleichmäßiger Deutlichkeit vorgestellt werde. Das vielmehr haben wir weiter als eine charakteristische Eigentümlichkeit der Raumvorstellung hervorzuheben, daß die Vorstellung jedes einzelnen Teiles, als ein nicht abgeschlossenes, die Möglichkeit einer unbegrenzten Fortsetzung aufweist, und somit die des unendlichen Raumes in einer durchaus eigenartigen Weise in nuce in sich schließt, in einer Weise, die wir lediglich durch den Hinweis auf die vollkommen übereinstimmenden Verhältnisse bei den Vorstellungen der Zeit und der Zahl erläutern können.

Ich bin nach alle dem nicht im Zweifel darüber, daß eine unbefangene und sorgsame Erwägung der jederzeit beobachtbaren psychologischen Verhältnisse uns dazu führt, die Raumvorstellung (ganz im Kantschen Sinne) als ein einheitliches und unveränderliches Element unseres Bewußtseins erkennen zu lassen. Dies Ergebnis steht zu den Helmholtzschen Anschauungen in gewisser Hinsicht im Gegensatz. Allein, wie vorhin schon angedeutet, die Bedeutung dieses Gegensatzes liegt doch überwiegend auf psychologischem und insbesondere auch logischem Gebiet. Dagegen läßt die hier festgelegte Anschauung diejenigen Fragen unberührt, die wir, wie ich glaube, als die physiologisch eigentlich interessierenden herausheben dürfen.[1]

Um was es sich hier handelt, ist unschwer mit einem Worte zu bezeichnen. Betrachten wir auch die Raumvorstellung als ein ein für allemal unveränderlich und einheitlich Gegebenes, und gehen wir auch davon aus, daß, namentlich

[1] Aus eben diesen Gründen dürfen und müssen wir hier von einer Besprechung der zahlreichen Versuche und Theorien absehen, die darauf ausgehen, die Raumvorstellung als solche zu analysieren oder ihre Entstehung zu erforschen.

unsere Gesichtsempfindungen stets in räumlicher Ordnung uns zum Bewußtsein kommen, so erhebt sich als ganz allgemeine Frage offenbar die, an welchen Stellen des Raumes, in welcher räumlichen Ordnung das einzelne Empfundene uns erscheint, die Frage nicht nach der Entstehung der Raumvorstellung als solcher, sondern nach den besonderen Verhältnissen der Lokalisation.

Es versteht sich, daß die Beantwortung dieser Frage in vollem Maße Gegenstand einer umfangreichen und mannigfaltigen empirisch-physiologischen Untersuchung ist, und daß die hier entwickelte Grundanschauung von der Natur der Raumvorstellung mit ihrer Beantwortung im allerverschiedensten Sinne vereinbar ist. Sie gibt insbesondere sowohl der von Helmholtz vertretenen empiristischen wie der entgegengesetzten nativistischen Auffassung dieser Verhältnisse Raum. Denn von vornherein denkbar und mit der hier betonten Natur der Raumvorstellung vereinbar erscheint selbstverständlich sowohl, daß diese Verhältnisse durch angeborene Einrichtungen fixiert, wie auch, daß sie ein Ergebnis der Erfahrung, des Erlernens, der Einübung seien.

Ein zweiter Punkt, in dem hier von der Helmholtzschen Lehre sozusagen a limine abgewichen werden muß, betrifft die Auffassung eben dessen, was wir als erfahrungsmäßiges Erlernen oder Einüben bezeichnen.

Bekanntlich hat Helmholtz diese Vorgänge stets als psychische aufgefaßt, sie auch im einzelnen in einer dementsprechenden Weise bezeichnet und gelegentlich wohl auch diese Annahme einer physiologischen Deutung direkt gegenübergestellt. Steht man auf dem Standpunkt, daß alle Bewußtseinserscheinungen irgendwelchen materiellen Vorgängen des Gehirnes entsprechen und in ihnen ihre Substrate haben, ein Standpunkt, der (trotz mancherlei Differenzen in bezug auf die besondere Auffassung jenes Parallelismus) wohl von der großen Mehrzahl aller Naturforscher zurzeit geteilt wird, so kann es auf den ersten Blick scheinen, als ob dadurch die Helmholtzsche Auffassung vom Ursprung der Lokalisationsgesetze grundsätzlich ausgeschlossen oder mindestens gegenstandslos gemacht werde. Indessen lehrt die genauere Erwägung doch, daß dies keineswegs der Fall ist. Denn was wir als ein Erlernen bezeichnen, ist in erster Linie ein aus mannigfaltiger Erfahrung wohlbekanntes und zwar zunächst nach seiner psychologischen Seite charakterisiertes Geschehen. Was wir damit meinen, wird dadurch nicht geändert, daß wir veranlaßt sind, uns irgendein materielles Substrat als Grundlage desselben zu denken. Auch eine materielle Auffassung des Erlernens wird daran niemals etwas ändern, daß wir es hier mit gewissen Arten des Geschehens zu tun haben, die sich, wie in ihrer psychischen Erscheinung, so auch in ihren materiellen Substraten als etwas Besonderes charakterisieren, und sie wird deren Gegensatz namentlich zu den durch die allgemeinen Bildungsgesetze des Organismus bestimmten Entwicklungen nicht aufheben, höchstens vielleicht eine Verwischung ihrer Grenzen als denkbar erscheinen lassen.

Die Frage also, ob die Lokalisation erlernt werde, ist von der besonderen Art, wie wir das Erlernen auffassen, ganz unabhängig und behält in der Hauptsache ihre Bedeutung, mögen wir nun das Erlernen als ein psychisches Geschehen oder mögen wir, für alles Psychische ein materielles Substrat fordernd, in ihr eine Entwickelung nervöser Verknüpfungen, Gestaltungen u. dergl. erblicken. Eine physiologische Auffassung alles Erlernens, wie sie von naturwissenschaftlicher Seite jetzt im allgemeinen als selbstverständlich betrachtet wird, und wie auch ich sie nach dem ganzen Stande unseres Wissens für eine unerläßliche

halte, stellt die zweite Modifikation dar, die meines Erachtens die Helmholtzsche Lehre erfahren muß. Ihre Bedeutung liegt noch weniger als die der ersterwähnten auf den uns hier eigentlich beschäftigenden Gebieten; auch bei einer physiologischen Auffassung des Erlernens kann die Frage, ob die Verhältnisse der Lokalisation sich durch Erlernen bestimmen, bejaht und verneint werden. Auch auf diesem Standpunkt also ist eine Anschauung, die sich der Helmholtzschen in der Hauptsache anschließt, ebensowohl denkbar wie die entgegengesetzte.

Während nun die Verhältnisse der Lokalisation, wie sie beim erwachsenen Menschen normalerweise bestehen, durch die schon seit lange bekannten Tatsachen als geklärt und festgestellt gelten können, ist Natur und Ursprung dieser Lokalisationsgesetze bis jetzt in hohem Grade kontrovers geblieben, insbesondere die von Helmholtz seinerzeit entwickelte empiristische Theorie auf vielfachen Widerspruch gestoßen. Es sind diese Fragen, denen die folgenden Erörterungen gewidmet sind.

Die Tatsachen, die hier in Betracht kommen und mit denen wir uns zu befassen haben, ordnen sich leicht in mehrere Gruppen und wir wollen die folgenden Darlegungen demgemäß gliedern. Wir können an die Spitze diejenigen stellen, die, am leichtesten und sichersten zu beobachten, dafür aber für die uns beschäftigende Frage nur indirekt von Bedeutung, für den hier verfolgten Zweck am schwierigsten zu verwerten sind, die Gesetze der Lokalisation, wie wir sie am erwachsenen Menschen unter normalen Umständen verwirklicht und eingehalten finden. Sind hier irgendwelche Verhältnisse der Ausbildung gar nicht ins Auge gefaßt, so kann es doch sein, daß die besondere Natur der hier bestehenden Zusammenhänge uns bezüglich der Art ihrer Entstehung Hinweise gibt und Vermutungen zu bilden gestattet. Als zweite Gruppe von Tatsachen sollen diejenigen angereiht werden, die sich auf die Änderung jener normalen Zusammenhänge unter irgendwelchen besonderen (in erster Linie durch krankhafte Störungen herbeigeführten) Bedingungen beziehen. Es versteht sich, daß diese Tatsachen für unseren Gegenstand ganz unmittelbar von großem Interesse sind. Denn wenn wir finden, daß irgendwelche Zusammenhänge unter veränderten Verhältnissen aufgehoben oder modifiziert werden können, so wird die Annahme berechtigt sein, daß ihre Erhaltung unter gewöhnlichen Umständen durch das normale Funktionieren bedingt und an dieses gebunden ist, und es wird dadurch mindestens wahrscheinlich gemacht, daß auch an ihrer Ausbildung die Funktion in gewissem Maße beteiligt ist. Demgemäß hat ja in bekannter Weise auch z. B. Helmholtz den Verhältnissen des Sehens bei Schielstellungen besonderes Interesse gewidmet und besondere theoretische Bedeutung beigemessen.

Als dritte Gruppe würden wir endlich diejenigen Tatsachen anzuschließen haben, die, wenn sie sich ermitteln ließen, in der unmittelbarsten Weise für unsere Frage entscheidend sein würden, alle diejenigen, die sich auf das Sehen der Neugeborenen beziehen. In der Tat: könnten wir uns vergewissern, was und wie das neugeborene Kind sieht, könnten wir zugleich verfolgen, wie das Sehen sich vervollkommnet und entwickelt, so würde sich die Bedeutung, die dabei der Einübung oder dem Erlernen beizumessen ist, wohl mit Sicherheit beurteilen lassen. Selbstverständlichen und bekannten Umständen zufolge stoßen diese Ermittelungen auf kaum überwindliche Schwierigkeiten. Einen gewissen, wenn auch freilich unvollkommenen und mit Vorsicht zu verwertenden Ersatz bieten

die Beobachtungen am operierten Blindgeborenen, Dinge, mit denen sich HELMHOLTZ schon im Text sehr eingehend beschäftigt hat, und auf die hier, im Hinblick auf einige neuere Beobachtungen, wenigstens kurz einzugehen ist.

Eine etwas eingehendere Besprechung werden wir dann noch gewissen allgemeinen Verhältnissen zu widmen haben, auf die wir geführt werden, sobald wir die Vorgänge des Erlernens und der Einübung unter dem Gesichtspunkt zerebraler Ausbildungen betrachten, Verhältnisse, deren ganz allgemeine Betrachtung für eine richtige Beurteilung der Lokalisationsfragen von Bedeutung ist. Und es wird auf der so gewonnenen Grundlage schließlich der Versuch zu machen sein, uns von der ganzen Bedeutung, die auf unserem Gebiete einerseits angeborenen Einrichtungen, andererseits der erfahrungsmäßigen Ausbildung zukommt, ein gewisses Bild zu machen.

2. Über die Verhältnisse der normalen Lokalisation.

Die Gesetze der normalen optischen Lokalisation sind, wenn wir zunächst von den genaueren quantitativen Verhältnissen absehen, in einer so gesicherten Weise und in so allseitiger Übereinstimmung festgestellt, daß wir in bezug auf sie kaum irgendwelche neue Ermittelungen zu verzeichnen haben. Wohl dagegen bieten sie in ihren allgemein anerkannten Eigentümlichkeiten den Anlaß zu einigen hierhergehörigen Bemerkungen. Als Hauptregel ist zu betonen, daß durch gewisse physiologische Momente der Eindruck derjenigen Richtung sich bestimmt, in dem das gesehene Objekt erscheint, durch ganz andere der der Entfernung. Wir können demgemäß vor allem Richtungs- und Entfernungslokalisation unterscheiden. In bezug auf die Verhältnisse der Richtungswahrnehmung haben wir dann weiter hervorzuheben, daß die Wahrnehmung in einer bestimmten Richtung die Lokalisation auf einer von einem Punkte unseres Körpers ausgehenden Graden bedeutet; insbesondere also unterscheidet sich nicht etwa die Lokalisation rechts- und linksäugiger Eindrücke in der Weise, daß die räumliche Bestimmung der einen eine Beziehung zum rechten, die der anderen eine Beziehung auf das linke Auge bedeutete. Die räumliche Bestimmung vielmehr, die wir als die wahrgenommene Richtung bezeichnen, enthält irgendeine Unterscheidung der beiden Augen überhaupt nicht, sie ist eine vollkommen einheitliche. Ich möchte diese Eigentümlichkeit als eine Synchyse der rechts- und linksäugigen Eindrücke bezeichnen. Worin die Bedeutung der hier hervorgehobenen Lokalisationsweise liegt, wird am anschaulichsten, wenn wir an die abweichende Art der Lokalisation denken, wie sie z. B. bei einer Betastung mit beiden Händen stattfindet und wie sie für die Augen ja als eine denkbare in Erwägung gezogen werden kann. Eine solche wäre dadurch charakterisiert, daß die Ortsbestimmung sich aus zwei Elementen, der Lage des Gesehenen zum rechten und zum linken Auge entsprechend, in einer Weise ergäbe, die den objektiv bestehenden räumlichen Verhältnissen sich etwa anschlössen. Bei einer Lokalisation dieser Art würden also die Eindrücke der beiden Augen differenziert, nach Maßgabe der Lage des Gesehenen gegenüber jedem einzelnen Auge und der Lagedifferenz dieser selbst zur Geltung kommen.

Die Eigentümlichkeit, die wir an der tatsächlich verwirklichten Lokalisation als eine fundamentale hervorheben und als Synchyse bezeichnen, besteht also darin, daß die Lokalisation von dieser, rechts- und linksäugiges streng verschieden verwertenden Art nicht ist. Sie enthält vielmehr (in den wahr-

genommenen Richtungen) eine Bestimmung, die den nur rechts- und den nur linksäugigen Eindrücken ganz identisch zukommt; und demgemäß ist sie auch beim gewöhnlichen zweiäugigen Sehen nicht das Resultat eines Mechanismus, in den Rechts- und Linksäugiges in ungleicher Weise einginge, sondern sie ist unmittelbar durch die auch den einäugigen Eindrücken zukommenden Bestimmungen gegeben und mit ihnen identisch.

Die Folgen der synchytischen Vereinigung sind am einfachsten zu übersehen, wenn wir annehmen, daß alle Richtungen auf einen und denselben, etwa in der Mitte zwischen beiden Augen gelegenen (als Zentrum der Sehrichtungen zu bezeichnenden) Punkt bezogen werden, daß ferner die gesehenen Richtungen in der bekannten Weise von den Netzhautorten der Bilder abhängen, und daß zwischen beiden Augen in der gleichfalls geläufigen Weise bestimmte Beziehungen der Korrespondenz (Richtungsgleichheit) stattfinden. Unter diesen Voraussetzungen, die jedenfalls mit großer Annäherung verwirklicht sind, ergibt sich dann die Regel des Zyklopenauges; es ergeben sich dann ferner die bekannten Abweichungen der wahrgenommenen von den objektiv gegebenen räumlichen Anordnungen, insbesondere die Erscheinungen der Diplopie, in denen wir den Beweis für jene Lokalisationsweise zu erblicken gewohnt und berechtigt sind. Es muß indessen doch bemerkt werden, daß es sich hier um weitere Verhältnisse handelt, deren ganz strenge und allgemeine Verwirklichung nicht völlig sicher ist, und die wir jedenfalls für unsere Betrachtung von der Tatsache der Synchyse absondern müssen. So brauchte jenes Zentrum nicht gerade in der Mitte zwischen den Augen gelegen zu sein, es könnte sehr wohl dem einen oder dem anderen näher liegen; es könnte auch eine mehr oder weniger wechselnde Lage haben, ja es könnte sogar für verschiedene Teile des Gesichtsfeldes die Lage mehr oder weniger verschieden sein. Unbeschadet der synchytischen Natur der Lokalisation könnte also die Beziehung der Seheindrücke auf unseren Körper recht wohl in manchen speziellen Hinsichten einigermaßen schwanken. Ferner muß auch betont werden, daß die Synchyse keineswegs eine festbestimmte Korrespondenzbeziehung bedeutet. Sie besteht nur darin, daß das rechte und linke Auge Richtungseindrücke auslösen, die ihrer Art nach übereinstimmend sind. Ob dabei ein bestimmter Punkt der rechten Netzhaut immer einem genau bestimmten der linken richtungsgleich ist, kann dabei zunächst dahingestellt bleiben.[1]

Es ist vielleicht der Gedanke an derartige Variabilitäten gewesen, der Helmholtz veranlaßte, wiewohl er für die Gesetze der normalen Lokalisation das einheitliche Zentrum der Sehrichtungen zugrunde legte, doch wiederholt auszusprechen, daß er dieses Verhältnis nicht gerade zum Mittelpunkt der Lokalisationslehre zu machen geneigt sei. Es mag dabei noch mitgewirkt haben, daß Hering, der die grundlegende Bedeutung jenes Verhältnisses gegenüber ganz abweichenden Auffassungen (wie sie namentlich von A. Nagel und Donders vertreten wurden) mit besonderem Nachdruck betonte, stets die Annahme ganz fest gegebener Identitätsverhältnisse damit verknüpft hat.

[1] Als streng gültige Regel für die Unrichtigkeiten der Wahrnehmung ergibt sich bei dieser Betrachtung dann nur die, daß, wenn A_1 und A_2 zwei Punkte der rechten und linken Netzhaut sind, die (unter den jeweils gegebenen Bedingungen) den gleichen Richtungseindruck erzeugen, die sämtlichen Punkte, die auf den beiden durch A_1 und A_2 gezogenen Visierlinien (oder in ihrer unmittelbarer Benachbarung) liegen, auf (oder in unmittelbarer Benachbarung) einer Geraden gesehen werden.

Eine Meinungsverschiedenheit jedoch über das normale Sehen unter gewöhnlichen Bedingungen war, wie hier noch besonders hervorgehoben sei, hiermit nicht verbunden. Vielmehr ist dieses ja auch von HELMHOLTZ durch die bekannte Regel des Zyklopenauges in einer Form dargestellt, die sich mit den Anschauungen HERINGs vollkommen deckt, in einer Form, über deren Zutreffen seit langer Zeit allgemeine Übereinstimmung herrscht, und in der auch die synchytische Vereinigung völlig durchsichtig ist.

Die Auseinanderhaltung der verschiedenen hier in Betracht kommenden Fragen wird erschwert durch den nicht sehr glücklich gewählten, durch schwankenden Gebrauch noch unklarer gewordenen Ausdruck Projektionstheorie.

Ursprünglich ist damit die Meinung bezeichnet worden, daß der Ort, an dem wir ein Objekt sehen, sich ergebe, wenn man im rechten und im linken Auge vom Netzhautbilde eine Gerade durch den Knotenpunkt ziehe, und zwar als Durchschnittspunkt dieser beiden Linien. In der Tat kann man hier von einer Herausprojektion der Netzhautbilder reden. Das jedoch, worauf es hier hauptsächlich ankommt und insbesondere das, worin die Theorie bestritten wurde und sich als unzutreffend herausgestellt hat, wird hierdurch nicht bezeichnet; dies ist nicht sowohl die Projektion (die auch hier immer nur ein uneigentlicher Ausdruck ist) als vielmehr die unabhängige Beziehung der Richtungen auf das rechte und linke Auge. Man sollte also hier von einer Theorie der bizentrischen Projektion reden. Und man könnte dann sagen, daß dieser die von HERING besonders nachdrücklich betonte, von HELMHOLTZ übrigens ganz ebenso vertretene Ansicht als Theorie einer unizentrischen Projektion gegenüberzustellen ist. Ganz unzutreffend ist es dagegen, die Projektion der Netzhautbilder der nativistischen Annahme von angeborenen Ortswerten gegenüberzustellen. Denn der Ausdruck der Projektion ist überhaupt niemals anders verwendet worden als zur Bezeichnung der Richtungen in denen der Erwachsene tatsächlich sieht. Auch versteht sich, daß wir diese (subjektiven) Sehrichtungen gar nicht anders beschreiben können, als indem wir sie als etwa übereinstimmend mit einer nach ihrer Lage zu unserm Körper objektiv definierten Linie bezeichnen. Die Tatsache also, daß der Erwachsene in bestimmten auf unseren Körper bezogenen Richtungen sieht, haben auch die Vertreter angeborener Raumwerte niemals in Abrede gestellt. Sprechen sie von Höhen- und Breitenwerten, so ist doch diesen (wie sich aus dem Verhältnis solcher Punkte, die in bezug auf sie übereinstimmen, aber ungleiche Entfernung besitzen, direkt ergibt) nicht ein bestimmter Abstand von der Boden- oder der Medianebene, sondern eben auch eine bestimmte Richtung gemeint. Auch im Sinne dieser Autoren also bedeutet Höhen- und Breitenwert, soweit sie sich auf das Sehen des Erwachsenen beziehen, eine Richtung, wie ja auch z. B. HERING in größtem Umfange von Sehrichtungen, einem Zentrum der Sehrichtungen usw. spricht.

Wenn man daher als Projektionstheorie die Ansicht bezeichnet, daß wir in (auf einen Mittelpunkt bezogenen) Richtungen sehen, daß diese Sehrichtungen eine der unserem Sehen zukommenden örtlichen Bestimmung darstellen (zu dem die der Entfernungen als eine zweite kommt), so kann über ihre Richtigkeit gar kein Zweifel bestehen, und sie wird in der von HELMHOLTZ und von HERING vertretenen Anschauung vom normalen Sehen gleichermaßen anerkannt. Zur Bezeichnung einer Ansicht darüber, wie diese Sehrichtungen entstanden sind oder sich entwickelt haben, kann dagegen der Ausdruck der Projektion überhaupt nicht verwendet werden; er würde hier ein nonsens, jedenfalls etwas von niemandem Behauptetes besagen und kann am wenigsten etwa der Lehre von den angeborenen Raumwerten gegenübergestellt werden.

Gänzlich irreführend ist es endlich, schlechtweg Projektionstheorie der Lehre von angeborenen Ortswerten gegenüberzustellen, und dabei unter der ersteren stillschweigend die Lehre einer bizentrischen Projektion zu verstehen, um dann in

der Nichtbestätigung dieser einen Beweis für jene zu erblicken. Hier werden zwei völlig verschiedene Dinge miteinander verquickt und gerade diejenige Anschauung, die HELMHOLTZ vertreten hat, ganz außer Acht gelassen.

Fragen wir weiter, wodurch sich die Richtungen bestimmen, in denen wir die verschiedenen Objekte wahrnehmen, so besteht, wie oben bereits angedeutet, auch darüber in der Hauptsache kein Zweifel: sie bestimmen sich einerseits durch den Angriffspunkt des betreffenden Lichtreizes auf der Netzhaut, andererseits durch die jeweilige Stellung der Augen. So sehen wir insbesondere das, was wir mit nach oben oder unten, nach rechts oder links gewendetem Blick fixieren, auch jedenfalls annähernd an seiner richtigen Stelle, oben oder unten, rechts oder links. Diesen, die Sehrichtung aller Netzhautstellen mitbestimmenden Faktor möchte ich, da es wünschenswert ist, eine einheitliche Bezeichnung für ihn zu haben, den Stellungsfaktor der Sehrichtungen nennen. Was die Umstände anlangt, durch die er sich bestimmt, so hat schon HELMHOLTZ gezeigt, daß es nicht sowohl auf die tatsächlich von dem Auge eingenommenen Stellungen, also die den verschiedenen Muskeln zukommenden Tätigkeitsgrade und Spannungen, als vielmehr auf die Bewegungsintentionen, also die zentral erzeugten Innervationsantriebe ankommt. Beachtenswert ist jedoch, daß dieser Stellungsfaktor sich überhaupt nicht allein durch den Zustand des Bewegungsapparates bestimmt, sondern im allgemeinen unsere optischen Wahrnehmungen selbst und insbesondere das Eingehen unserer eigenen Körperteile für ihn mitbestimmend werden, wie dies insbesondere aus den interessanten Beobachtungen E. FICKS hervorgeht.[1]

Sodann muß hier als wichtig hervorgehoben worden, daß dieser Stellungsfaktor normalerweise ein für beide Augen einheitliches Moment darstellt. Wie also die Richtungen, in denen rechts- und linksäugige Eindrücke wahrgenommen werden, sich nicht etwa dadurch unterscheiden, daß sie auf verschiedene Ausgangspunkte bezogen werden, so macht sich auch die Stellung oder die Innervation des Einzelauges in unserem Sehen nicht bemerklich; es ist immer nur ein Stellungsfaktor der die sämtlichen Sehrichtungen mitbestimmt, wie dies am einfachsten aus der Tatsache hervorgeht, daß die Sehrichtungen korrespondierender rechts- und linksäugiger Stellen immer die gleichen sind, welcher Art auch der Stellungsfaktor sein mag.

Trotz ihrer Einfachheit enthalten diese Tatsachen einiges, was unter dem uns hier beschäftigenden Gesichtspunkt besondere Beachtung verdient. Es ist die eigentümliche Art, wie sich diese ganz heterogenen Dinge, einerseits der objektive Ort des Angriffs auf der Netzhaut, andererseits die Augenstellung, zu einem Ergebnis verknüpfen, das als ein einheitliches und fertiges ins Bewußtsein tritt. Was ich hier meine, wird am deutlichsten, wenn wir z. B. die folgende Beobachtung machen: wir fixieren zunächst ein gerade vor uns etwa in gleicher Höhe gelegenes Objekt O_1; wir erheben sodann den Blick zu einem höher gelegenen Objekt O_2 und fixieren dies, wobei nun O_1 indirekt weiter wahrgenommen wird. Wir haben in einem solchen Falle nicht den Eindruck, daß das Objekt O_1 seinen Ort verändert hätte, wir sehen es vor und nach der Blickbewegung an genau der gleichen Stelle. Der Unbefangene wird das Ver-

[1] E. FICK, Über die Projektion der Netzhautbilder nach außen. Zeitschrift für Psychologie. 29. S. 122. 1905.

hältnis niemals anders beschreiben, als daß der gesehene Ort oder die räumliche Bestimmung des gesehenen genau die nämliche geblieben sei. Die wahrgenommene Richtung (oder, wenn wir so wollen, der Höhen- und Breitenwert des Gesehenen) bestimmt sich durch das Zusammenwirken der erwähnten beiden Momente, so zwar, daß ein Netzhautort bei einer, ein anderer bei einer anderen Augenstellung genau die nämlichen Richtungswerte ergeben kann.

Wenn man ferner behaupten wollte, es komme doch auch der Netzhautort unmittelbar zur Geltung, indem ihm als Korrelat in der Empfindung der Abstand vom Fixationspunkt entspreche, so lehrt eine aufmerksame Selbstbeobachtung, daß eben dies nicht der Fall ist. Fixieren wir einen Punkt F und richten zugleich unsere Aufmerksamkeit auf einen exzentrisch gesehenen Punkt E. Wenden wir nun den Blick auf irgendeinen anderen Punkt F', so können wir uns freilich denjenigen Punkt suchen, der zu F' die gleiche Lage hat wie E zu F. Allein es unterliegt gar keinem Zweifel, daß wir hierbei nicht in ähnlicher Weise wie bei dem gleichbleibenden Ort den Eindruck von etwas der ersten und zweiten Wahrnehmung übereinstimmend zukommendem haben; erst mittels einer bewußten Reflexion leiten wir die Vorstellung einer gleichen Lage relativ zum fixierten Punkt aus dem unmittelbar gegebenen ab.

Wenn wir also an unseren optischen Eindrücken eine räumliche Bestimmung bezeichnen wollen, die uns als solche zum Bewußtsein kommt, und die wir an verschiedenen optischen Eindrücken als ein übereinstimmendes erkennen, so ist unbestreitbar, daß dies keine andere ist, als eben die auf den Körper des Sehenden bezogene, durch Netzhautort und Stellungsfaktor sich bestimmende Sehrichtung.

Ist also auch anzuerkennen, daß der Ort des Gesehenen durch die Einheitlichkeit und Unmittelbarkeit, mit der er ins Bewußtsein tritt, den Empfindungsqualitäten völlig gleich steht, so weist doch schon die speziellere Art, wie er sich bestimmt, seine Abhängigkeit von ganz ungleichartigen Momenten, die zu seiner Erzeugung zusammenwirken, auf einen physiologischen Mechanismus von ganz anderer Art hin, als wir ihn für all das kennen, was wir im engeren Sinne Bestimmungen der Empfindung zu nennen pflegen.

Zu sehr ähnlichen Bemerkungen gibt uns auch eine Betrachtung der Tiefenlokalisation Anlaß. Auch hier dürfen wir (und zwar indem wir uns lediglich auf bekannte und allseitig anerkannte Tatsachen stützen) als vorzugsweise beachtenswert das hervorheben, daß die Entfernung, in der wir etwas sehen, sich in einer ungemein verwickelten Weise aus dem Zusammenwirken einer ganzen Reihe der verschiedenartigsten Momente bestimmt. Die scheinbare Größe von Gegenständen bekannter absoluter Ausdehnung, der Verlauf der Umrisse, Licht- und Schattenverhältnisse, Luftperspektive, endlich die ganzen Verhältnisse der binokularen Entfernungswahrnehmung, alle diese Momente können für die Entfernung, in der wir etwas sehen, bestimmend werden und sind es unter Umständen. Auch über die besondere Art, wie sich die gesehenen Entfernungen durch diese Momente bestimmen, besteht in der Hauptsache Übereinstimmung. Wenn insbesondere Hering den einzelnen Orten der Netzhaut bestimmte Tiefenwerte zuschrieb, so wird man beachten müssen, daß diese ja nicht den die Erregung einer bestimmten Netzhautstelle unter allen Umständen begleitenden Entfernungseindruck bedeuten sollten. Vielmehr war die Meinung

in erster Linie die, daß jene Werte zur Geltung kommen, wenn Objekte binokular wahrgenommen werden. In diesem Falle sollten dann die Tiefenwerte der beiden Netzhautstellen, auf die die Bilder desselben Objekts fallen, sich zusammenaddieren und so eine Entfernungsvorstellung erzeugen, die jedenfalls qualitativ mit der tatsächlich beobachteten und auch von allen anderen Untersuchern angenommenen zusammentraf. Ebenso wurde anerkannt, daß bei einäugigem Sehen die „empirischen Momente" jene Tiefenwerte überwiegen und zurückdrängen können. So ergibt sich als einziger Fall bez. dessen auch in bezug auf die unmittelbar zu konstatierenden Wahrnehmungstatsachen Meinungsverschiedenheiten bestanden, der einer einäugigen Wahrnehmung bei völligem Ausschluß der empirischen Momente, ein Fall, auf den wir weiter unten einzugehen haben.

Es sind zunächst die Verhältnisse der binokularen Tiefenwahrnehmung, die wir hier einer Erörterung unterziehen müssen. Die hier in Betracht kommenden rein tatsächlichen Verhältnisse können dem eben Gesagten zufolge ohne einer Meinungsverschiedenheit zu begegnen, dahin angegeben werden, daß, wenn annähernd oder genau übereinstimmende rechts- und linksäugige Bilder zu der Vorstellung eines einheitlichen Gegenstandes vereinigt werden, dieser je nach den Vorzeichen der „Querdisparation" in kleinerer oder größerer Entfernung gesehen wird als der fixierte Punkt. Die Erzeugung eines bestimmten Entfernungseindrucks hängt also davon ab, ob die Eindrücke zweier bestimmter, dem rechten und linken Auge angehörigen Stellen zu der Vorstellung desselben Gegenstandes verschmelzen. Wodurch bestimmt es sich nun aber, ob dies geschieht? Jeder Versuch, diese Bedingungen des genaueren zu bezeichnen, lehrt, wie ungemein verwickelt sie sind. Das einzige, was man in dieser Hinsicht als bestimmend herausheben kann, ist die Ähnlichkeit im Verlauf der Umrisse. Allein es ist klar, daß wir daraufhin doch nur in einfachsten Fällen die Bedingungen der binokularen Vereinigung einigermaßen befriedigend angeben können. Enthält das rechte wie das linke Gesichtsfeld einen durch den Fixationspunkt laufenden schwarzen Strich der links im Uhrzeiger-, rechts im entgegengesetzten Sinne um ein weniges von der Vertikalen abweicht, so können wir vielleicht behaupten, daß diese Bilder in uns mit zwingender Notwendigkeit den Eindruck eines Objekts hervorbringen, das mit dem oberen Ende gegen uns geneigt ist. Allein wir brauchen uns nur den Winkel der beiden Bilder allmählich vergrößert zu denken, um zu bemerken, daß bei Überschreitung einer gewissen Grenze jener Eindruck nicht mehr entsteht, sondern zwei sich kreuzende Objekte gesehen werden. Daß hier ein ganz bestimmter Winkelwert als Grenze angegeben werden kann, wird kaum jemand behaupten wollen; vielmehr existiert ohne Zweifel ein Bereich, in dem die Vereinigung zwar stattfinden kann, aber nicht stattzufinden braucht, d. h. ihr Eintreten nicht allein durch den Verlauf der durch den Fixationspunkt laufenden Linien bestimmt wird, sondern noch außerdem von irgendwelchen anderen Bedingungen abhängt. Denken wir uns ferner durch jeden Fixationspunkt nicht nur eine sondern zwei oder noch mehr geradlinige Konturen in verschiedenen Richtungen laufend. Unter geeigneten Umständen vereinigt sich alsdann jeder Eindruck des linken Auges mit einem bestimmten des rechten; und wir werden fragen dürfen, worauf denn diese bestimmte Auswahl der Kombination zurückzuführen ist. Im allgemeinen wird nun dies unregelmäßig und schwankend sein, wenn wir den beiden Augen

lediglich Gruppen sich sternförmig kreuzender Striche darbieten; dagegen fixiert sich die Auffassung in ganz bestimmter Weise, wenn, ähnlich wie es bei wirklich körperlichen Objekten der Fall ist, in weiterem Abstande vom fixierten Punkt ganz bestimmte Strichpaare aufhören, umbiegen usw. Es zeigt sich also, daß die Verschmelzung zweier dem rechten und linken angehörigen Punkte nicht allein von dem auf ihnen selbst und auf den ihnen unmittelbar benachbarten Teilen abgebildeten abhängt, sondern daß in einer überaus verwickelten Weise die Eindrücke des ganzen Gesichtsfeldes dabei mitbestimmend werden. Und wollen wir diesen Zusammenhang des genaueren bezeichnen, so können wir nur sagen, daß, wenn eine Vereinigung möglich ist, die einen einheitlichen körperlichen Gegenstand der uns gewohnten und geläufigen Beschaffenheit ergibt, dann im allgemeinen diese auch eintritt, während andere nach Maßgabe lokaler Umrißverläufe gleichfalls mögliche Vereinigungen, die eine Anzahl zusammenhangloser Gebilde ergeben würden, nicht eintreten. Hierzu kommt sodann noch ein weiteres. Es ist bekannt, daß z. B. bei Betrachtung komplizierter stereoskopischer Figuren die binokulare Fixation übereinstimmender Punkte keineswegs ausreicht, um sofort den richtigen Eindruck der körperlichen Gestaltung hervorzurufen, dieser vielmehr erst nach einer längeren Betrachtung entsteht. Die sich erst nach einiger Zeit einstellende Bedingung der stereoskopischen Vereinigung können wir vorderhand nur in psychologischer Weise bezeichnen, indem wir sagen, daß der Beobachter das Objekt *verstehen* muß, und daß für dieses Verständnis beim Betrachten verwickelter stereoskopischer Zeichnungen (ebenso wie auch komplizierter körperlicher Gegenstände) eine oft sehr merkbare Zeit erforderlich ist.

Es wird nützlich sein, gerade hier auf die oben betonte Äquivalenz psychologischer und physiologischer Bezeichnung hinzuweisen. Die Bedingungen, auf die wir hier geführt werden, haben wir zunächst mit einem psychologischen Begriff bezeichnet. Dies schließt nicht aus, daß wir sie uns als bestimmte physiologische Verhaltungsweisen denken; und man kann dies je nach den allgemeinen psychophysischen Anschauungen für denkbar, für wahrscheinlich oder auch für selbstverständlich halten. Der Versuch aber, solche zu bezeichnen, würde uns nötigen, auf den völlig unsicheren Boden rein hypothetischer Vorstellungen uns zu begeben, wie z. B. wenn wir von der Herstellung leitender Verbindungen zwischen den zentralen Erfolgsorten bestimmter rechts- und linksäugiger Netzhautstellen reden wollten. Eben deshalb also und lediglich deshalb weil uns jene Bedingungen nur nach ihrer psychologischen Bedeutung einigermaßen bekannt sind, können wir sie auch nicht anders als mit Benutzung psychologischer Begriffe bezeichnen und beschreiben.

Um die Verhältnisse der binokularen Entfernungswahrnehmung richtig zu beurteilen, müssen wir also (wie wir, das bisherige zusammenfassend, sagen können) vor allem beachten, daß es von überaus verwickelten Bedingungen abhängt, in welcher Kombination rechts- und linksäugige Eindrücke zu der Vorstellung eines einheitlichen Objekts vereinigt werden, von Bedingungen, die wir (ohne daran zu zweifeln, daß sie eine bestimmte physiologische Bedeutung besitzen) vorderhand nur in psychologischer Bezeichnungsweise angeben können.

Abgesehen von den Bedingungen der binokularen Vereinigung haben wir die Verhältnisse der Entfernungslokalisation noch in einigen anderen Hinsichten einer etwas genaueren Besprechung zu unterziehen.

Der erste hier noch anzureihende Punkt ist das Verhältnis der binokularen Tiefenwahrnehmung zu den zahlreichen anderen die Entfernungseindrücke be-

stimmenden Momenten, die wir als empirische zusammenzufassen gewohnt sind. Ganz analog dem, was wir oben für die Bestimmung des Richtungseindruckes durch Netzhaut und Augenstellung ausführten, können wir auch hier zunächst hervorheben, daß der Eindruck des bestimmten Abstandes eines gesehenen Objekts uns als etwas Einheitliches und Fertiges zum Bewußtsein kommt, ohne daß dabei bemerklich wird, in welcher Weise die verschiedenen Momente an seiner Erzeugung beteiligt sind, und (was damit zusammenhängt) daß die in ganz verschiedener Weise zustande gekommenen Entfernungseindrücke als solche völlig gleichartig sind. Fixieren wir zunächst ein näheres Objekt und richten wir dann das Auge auf ein mit geringer Richtungsdifferenz in größerem Abstand gelegenes, so ändert sich hierbei die Modalität der Entfernungswahrnehmung für das nähere Objekt. Es wurde zuerst ohne Querdisparation gesehen, wobei sein Entfernungseindruck wesentlich durch empirische Momente bestimmt werden mußte. Bei der Fixation des entfernten Gegenstandes dagegen bestimmt sich die Entfernung, in der wir nunmehr den nahen Gegenstand sehen, einerseits durch den Entfernungswert des fixierten Punktes, andererseits durch die dem näheren nun zukommende Querdisparation.

Gleichwohl haben wir bei dem Übergang von der einen zu der anderen Wahrnehmung in keiner Weise den Eindruck irgendeiner Veränderung: die unbefangene Beschreibung des Gesehenen wird vielmehr konstatieren können, daß der Gegenstand an seiner Stelle zu verharren scheint, daß seine räumlichen Bestimmungen genau die nämlichen bleiben, die sie waren.

Wenn wir ferner bei Betrachtung komplizierter Gegenstände in verschiedenen Entfernungen ein Auge schließen und so die binokulare Tiefenwahrnehmung ganz ausschalten, so haben wir im allgemeinen auch nicht den Eindruck irgendeiner greifbaren und deutlichen Änderung. Auch das einäugige, auf die empirischen Momente beschränkte Sehen vermag also ganz die nämlichen Entfernungseindrücke, die das zweiäugige liefert, wenn auch vielleicht nicht selbständig zu erzeugen, jedenfalls wenn sie einmal entstanden sind, festzuhalten.

Auf beachtenswerte Erscheinungen stoßen wir endlich, sobald wir die quantitativen Verhältnisse der Tiefenlokalisation ins Auge fassen.

Wollen wir für die binokulare Tiefenwahrnehmung ein bestimmtes physiologisches Moment angeben, mit dem wir sie in eine feste quantitative Verbindung bringen können, so kann dies nur in der Abweichung von der genauen Korrespondenz gefunden werden, die für zwei demselben Gegenstande angehörige und zu einer Tiefenwahrnehmung zusammenwirkende Netzhautbilder besteht, also in dem was wir mit Hering die Querdisparation nennen. Die Querdisparation ergibt je nach ihren positiven oder negativen, größeren oder kleineren Werten den Eindruck eines positiven oder negativen, größeren oder kleineren Tiefenabstandes vom fixierten Punkt. Fragen wir demgemäß nach dem genaueren quantitativen Zusammenhange zwischen Querdisparation und Tiefenabstand (vom Fixationspunkt), so begegnen wir der schon früher hervorgehobenen Tatsache, daß ein solcher jedenfalls nicht in der Form besteht, daß etwa eine bestimmte Querdisparation immer den Eindruck eines bestimmten allemal gleichen Tiefenabstandes erzeugte. Wir sahen, daß ein Zusammenhang dieser Art zu den gröbsten Täuschungen führen würde und sicher nicht verwirklicht ist.

Vielmehr lehrt die Untersuchung, daß es überhaupt unmöglich ist, einer bestimmten Querdisparation einen bestimmten Betrag des wahrgenommenen Ent-

fernungsunterschiedes als ihren unter allen Umständen gleichmäßig eintretenden Erfolg zuzuordnen. Die gleiche Querdisparation ergibt, wenn wir den fixierten Punkt in großer Entfernung sehen, den Eindruck eines großen, wenn wir den fixierten Punkt in kleinem Abstande sehen, den eines geringen Tiefenunterschiedes, gleichviel auf welchen Umständen die Tiefenlokalisation des fixierten Punktes selbst beruht. Sobald wir also die quantitativen Verhältnisse berücksichtigen, müssen wir konstatieren, daß die Querdisparation nicht für sich allein den Eindruck eines bestimmten Tiefenunterschiedes ergibt, sondern daß neben ihr stets auch die mannigfaltigen Momente, die die Entfernungslokalisation des fixierten Punktes bestimmen, mit ins Spiel kommen.

Endlich ist es, wie wir sahen, mindestens für gewisse Fälle sehr wahrscheinlich, daß die empirischen Momente nicht nur, sofern sie die Wahrnehmung des fixierten Punktes bestimmen, die binokulare Entfernungswahrnehmung beeinflussen, sondern daß auch bei bestimmter Wahrnehmung des Fixationspunktes tiefendistante Objekte binokular und dabei zugleich in einer durch solche empirische Momente quantitativ des genaueren bestimmten Weise gesehen werden (s. o. S. 326).

Bei einem zusammenfassenden Überblick der Tiefenlokalisation drängt sich daher die gleiche Bemerkung, die wir schon an die Richtungslokalisation knüpften, wiederum und wohl in noch viel stärkerem Grade auf. Die Mannigfaltigkeit der Bedingungen, von denen der Tiefeneindruck abhängt, die verwickelte und wechselnde Art, wie diese Bedingungen zusammenwirken, weist uns auf einen (physiologischen oder psychologischen) Mechanismus hin, der von dem für Empfindungsqualitäten (im engeren Sinne) bestehenden jedenfalls gänzlich verschieden sein muß und bez. dessen kein Zweifel bestehen kann, daß er in gewissem Umfange empirisch ausgebildet wird. Trotzdem zeigt sich aber auch hier, daß das Ergebnis desselben, eben ein bestimmter Tiefeneindruck, mit der vollen Unmittelbarkeit einer Empfindung als etwas ohne weiteres und fertig gegebenes ins Bewußtsein tritt. Die Prüfung der normalen und gewöhnlichen Lokalisationsgesetze führt uns also auch hier auf Verhältnisse, die sehr eigenartig und, wie ich glaube, schon durch diese Eigentümlichkeiten für die uns beschäftigenden theoretischen Fragen von Bedeutung sind. Wir werden unter diesem Gesichtspunkte später wieder darauf zurückzukommen haben.

3. Über Änderungen der Lokalisation bei anomalen Augenstellungen.

Wie oben bereits angedeutet, können wir erwarten, vorzugsweise wichtige Einblicke in die physiologischen Verhältnisse der Lokalisation zu gewinnen, wenn es uns gelingt zu ermitteln, ob die normalerweise bestehenden Zusammenhänge irgendwelcher Veränderungen fähig sind, eventuell in welcher Hinsicht und unter welchen Umständen solche Veränderungen eintreten. Der bei weitem wichtigste Fall, in dem wir solche Änderungen erwarten können, und die Erfahrung ihr Eintreten zu bestätigen scheint, ist durch die Stellungsanomalien der Augen gegeben. Es sei hier zunächst daran erinnert, daß solche Stellungsanomalien im allgemeinen zu erheblichen Störungen des Sehens führen; und es wird zweckmäßig sein, über diese Störungen hier ein Wort vorauszuschicken. Sie beruhen in letzter Instanz auf Verhältnissen, die auch für das normale Sehen gewisse Unrichtigkeiten herbeiführen, auf der Tat ache nämlich, daß die Richtungen, in denen wir die äußeren Gegenstände sehen, nicht auf

den Ort des einen oder anderen Auges, sondern auf ein gemeinsames Zentrum bezogen werden. Sehen wir die Gegenstände mit Bezug auf dieses Zentrum in Richtungsanordnungen, die den objektiv für das rechte und linke Auge gegebenen annähernd entsprechen, von den für dieses Zentrum bestehenden demgemäß verschieden sind, so ist damit eine gewisse Unkorrektheit der Richtungsanordnung gegeben, als deren Spezimen ja die normale binokulare Diplopie vorzugsweise bekannt und geläufig ist.

Diese Unrichtigkeiten sind nun aber unter normalen Umständen in sehr wichtiger Weise dadurch beschränkt, daß stets derselbe äußere Gegenstand auf den beiden Stellen des deutlichsten Sehens abgebildet wird, durch das Gesetz der binokularen Fixation. Hierdurch wird insbesondere bewirkt, daß die Erscheinung der binokularen Diplopie, die Wahrnehmung eines Objekts an zwei verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes, sich auf indirekt gesehene Gegenstände beschränkt.

Sobald nun aber jenes Gesetz durchbrochen wird, also ein Auge einen, das andere einen anderen Punkt unserer Umgebung fixiert, bringen die allgemeinen Regeln der Richtungslokalisation es mit sich, daß auch der von dem einen Auge fixierte Punkt von diesem und dem anderen an zwei verschiedenen Stellen gesehen wird: es ergibt sich die Möglichkeit der Diplopie auch für einäugig fixierte Punkte.

Wenn ferner rechtes und linkes Auge verschiedene, insbesondere weit auseinandergelegene Punkte fixieren, so müssen den Gesetzen der Korrespondenz zufolge diese in Wirklichkeit voneinander entfernten Punkte zusammenfallend, eventuell in naher Benachbarung gesehen werden, eine Wahrnehmung die bez. der relativen Lage der beiden Objekte irrtümlich ist und wobei im allgemeinen mindestens das eine auch in seiner absoluten Lage (d. h. in seiner Lage zum Körper des Sehenden) falsch aufgefaßt sein muß. Ich will diese Erscheinungen, für die eine kürzere Bezeichnung ebenfalls wünschenswert ist, eine Konfundierung nennen. Wir können dann sagen, daß die allgemeinen Prinzipien, nach denen normalerweise die Richtungslokalisation erfolgt, die Möglichkeit für Diplopien und Konfundierungen involvierten, und daß diese bei Stellungsanomalien, bei denen nicht mehr binokular fixiert wird (sofern die Lokalisationsgesetze unverändert sind), wegen ihrer Erstreckung auch auf die fixierten Objekte und ihre unmittelbare Umgebung weit stärker hervortreten und weit störender werden müssen, als sie es normalerweise sind.

Es ist bekannt, daß Erscheinungen dieser Art in der Tat eintreten, wenn wir Stellungsanomalien bei normalen Augen künstlich herbeiführen (wozu schon ein leichter Druck auf einen Bulbus genügt) oder wenn sie infolge einer krankhaften Störung, z. B. Lähmung eines oder einiger Augenmuskeln, in kurzer Zeit eingetreten sind, und daß sie in diesem Falle sich als schwere Belästigungen der Patienten bemerklich machen. Nicht minder bekannt ist dagegen, daß diese Störungen nicht dauernd bestehen; bei den durch Lähmung erzeugten Stellungsanomalien schwinden sie allmählich, und bei den von Kindheit an bestehenden, sei es angeborenen, sei es allmählich entwickelten Stellungsabweichungen, also bei den im engeren Sinne als Strabismen bezeichneten Zuständen werden sie vermißt. Es kommt also vor, daß die Augen eines Schielenden sich dauernd in einer mehr oder weniger abnormen Stellung befinden, insbesondere auch bei der Konzentration der Aufmerksamkeit auf einen Punkt so stellen, daß dieser

im einen Auge auf der Fovea, im anderen aber exzentrisch abgebildet wird, gleichwohl aber von jenen Störungen der Diplopie und Konfundierung ebensowenig wie unter normalen Verhältnissen zu bemerken ist. Es kann nun wohl als die einfachste und nächstliegende Annahme erscheinen, daß hier die normalerweise zwischen den beiden Augen bestehenden Korrespondenzbeziehungen zufolge der Stellungsanomalien eine Abänderung, gewissermaßen eine Verschiebung erfahren haben, derzufolge z. B. der der rechten Fovea zugehörige Richtungseindruck nicht mit dem der linken Fovea, sondern mit dem einer exzentrischen Stelle des linken Auges übereinstimmen würde; wenn in ähnlicher Weise durchweg die Korrespondenzbeziehungen verschoben wären, so würde offenbar der Nachteil der Stellungsanomalie in gewisser Weise kompensiert sein. Ich will eine solche neugebildete Beziehung eine sekundäre Korrespondenz nennen und ihr die normale als primäre gegenüber stellen, demgemäß von sekundär und von primär korrespondierenden Stellen sprechen.

Daß eine Abänderung der Korrespondenzbeziehungen bei Strabismen vorkommt, ist von Helmholtz auf Grund der damals vorliegenden Beobachtungen für wahrscheinlich gehalten worden.[1] Ohne weiteres ist ersichtlich, daß, wenn sich dies wirklich so verhält, darin für die Zurückführung auch der normalen Korrespondenz auf Einübung und Erlernung ein starkes Argument liegen würde. Und demgemäß hat denn auch für die späteren Untersuchungen die Frage, ob die Sehverhältnisse derart sind, daß man von einer Ausbildung neuer Korrespondenzbeziehungen reden darf, meist im Mittelpunkt des Interesses gestanden, und ist für die Untersuchungen selbst vielfach bestimmend geworden.

Wenn nun auch einleuchtet, daß die mit einer Stellungsanomalie verknüpften Störungen durch eine Abänderung der Korrespondenzbeziehungen beseitigt werden können, so ist doch klar, daß wir aus dem Fehlen solcher Störungen nicht ohne weiteres auf die Ausbildung veränderter Korrespondenzbeziehungen schließen dürfen, da jedenfalls auch an eine ganze Reihe anderer Modifikationen gedacht werden muß, die in ähnlicher Weise zu einer Ausgleichung jener Störungen führen können. Diese Möglichkeiten von vornherein erschöpfend zu übersehen sind wir natürlich kaum in der Lage. Andererseits besteht auch bei der Untersuchung schielender Personen immer in hohem Maße die Gefahr, nicht nur durch ihre mangelhafte Aufmerksamkeit und ungenügende Beobachtung, sondern auch durch eine unzutreffende Auffassung ihrer Angaben irre geführt zu werden. Und so ist die sichere und genaue Feststellung der Art und Weise, wie ein Schielender eigentlich sieht, eine Aufgabe von großer Schwierigkeit. Bei dieser Sachlage ist es von Wert, daß wir gewisse Modifikationen des normalen Sehens mit Sicherheit nachweisen können. Und ich glaube, daß wir auch für die Erörterung des ganzen hierher gehörigen Tatsachenmaterials den zweckmäßigsten Ausgangspunkt und den besten Leitfaden gewinnen, wenn wir diese sichergestellten Vorgänge klar legen.

Als gesicherte und übersehbare Modifikation normalen Sehens können wir hier zunächst eine anführen, deren Bedeutung auf dem uns beschäftigenden

[1] Übrigens sei gleich hier darauf hingewiesen, daß Helmholtz, wenn er von der Ausbildung neuer Korrespondenzbeziehungen sprach, eine solche wohl kaum in dem ganz erschöpfenden Sinne im Auge hatte, in dem wir später davon sprechen werden, sondern jedenfalls in erster Linie das meinte, was wir auch hier zunächst allein erwähnt haben, die Änderung der Richtungsbeziehungen.

Gebiete schon lange in Betracht gezogen worden, und insbesondere auch den Augenärzten geläufig ist. Sie besteht in einer gewissen Abänderung der Wettstreitsverhältnisse. Unserer Beobachtung und unserem Verständnis ist sie besonders durch den Umstand zugänglich gemacht, daß sie, wenigstens andeutungsweise, sich häufig bei Personen findet, deren Sehweise wir noch nicht als eine anomale zu betrachten gewohnt sind. Die Erfahrung lehrt (es wird dies insbesondere jedem, der die Physiologie des Gesichtssinnes regelmäßig vorträgt, geläufig sein), daß die Wahrnehmung der normalen Diplopie-Erscheinungen für viele Personen in eigentümlicher Weise erschwert ist. Die Dinge verhalten sich hier etwa folgendermaßen. Der Beobachter fixiert ein entferntes Fensterkreuz; einen annähernd in der Medianebene gehaltenen Finger, der in gekreuzten Doppelbildern rechts und links neben dem Fensterstab erscheinen sollte, sieht er aber nur an der einen Stelle. Wir lassen ihn, um die Wahrnehmung der Doppelbilder zu erleichtern, abwechselnd das eine und das andere Auge schließen (oder verdecken); er sieht den Finger mit dem rechten Auge links, mit dem linken Auge rechts vom Fensterstab. In dem Augenblick aber, wo das zweite Auge geöffnet oder aufgedeckt wird, verschwindet regelmäßig das Halbbild des zuvor schon sehenden Auges, oder es wird das des neu in Funktion tretenden nicht sichtbar, so daß immer nur ein Halbbild des Fingers, nicht aber beide zusammen gesehen werden.

Ob in diesen Fällen immer ein bestimmtes Gesichtsfeld oder abwechselnd zuweilen das eine, zuweilen das andere überwiegt, muß ich in Ermangelung besonderer Untersuchungen über diesen Punkt dahin gestellt sein lassen. Häufig wird sicher das erstere der Fall sein, und die ganze Verhaltungsweise sich auf ein durch bessere Sehschärfe oder Refraktion bedingtes Übergewicht des einen Auges zurückführen lassen. Aber es ist beachtenswert, daß wir uns die Erscheinung auch ohne diese Annahme erklären können; und sie führt uns, wenn wir sie unter diesem Gesichtspunkt betrachten, auf eine eigentümliche Gestaltung der Wettstreitsverhältnisse, eine Gestaltung, die (wie hier gleich bemerkt sei) bei Schielenden sicher eine große Rolle spielt. Können, wie es hier der Fall ist, die beiden Halbbilder nicht gleichzeitig gesehen werden, so besagt dies ja, daß, wenn z. B. das linke Halbbild sichtbar ist, also an einer bestimmten Stelle der linksäugige Eindruck überwiegt, jedesmal auch an der anderen Stelle, wo sich das rechtsäugige Halbbild befindet, dieses unterdrückt wird und der linksäugige Eindruck zur Geltung kommt. Während also normalerweise die Wettstreitsverhältnisse in der Weise voneinander örtlich unabhängig sind, daß an einer Stelle der rechts- an einer anderen der linksäugige Eindruck überwiegen kann, besteht hier ein Zusammenhang derart, daß an beiden Stellen der gleiche (sei es nun der rechts-, oder der linksäugige) zur Perzeption kommt. Ich will dies Verhalten als einen *regionären Zusammenhang* des Wettstreites bezeichnen.

Er bedeutet, wie hier nochmals hervorgehoben sei, keineswegs ein regelmäßiges Überwiegen eines bestimmten Gesichtsfeldes und ist daher nicht mit dem, was die Ophthalmologen eine habituelle Exklusion nennen, zu verwechseln. Es handelt sich hier nur darum, daß für alle Teile eines größeren Bezirks die Wettstreitsverhältnisse derart zusammenhängen, daß überall und durchgängig *dasselbe* Auge überwiegt. Ob damit ein Übergewicht des einen Auges verknüpft ist, so daß gerade dieses immer oder überwiegend häufig das obsiegende ist, das ist

zunächst durchaus fraglich, und wir müssen daher das hier gemeinte Verhalten ganz ohne Rücksicht hierauf bezeichnen.

Wenn wir einem regionären Wettstreit den normalen als einen örtlich unabhängigen gegenüberstellen, so muß betont werden, daß es sich hier nicht um einen prinzipiellen Gegensatz handelt, sondern nur um einen graduellen Unterschied. Denn schon bei den bekannten Beeinflussungen des Wettstreites durch auffällige Umrisse und dergl. ist ja zu bemerken (und zwar für jedermann), daß das Obsiegen des rechtsäugigen Eindruckes an einer Stelle für die unmittelbare Nachbarschaft die rechtsäugigen Eindrücke begünstigt. Diese Begünstigung nimmt aber mit wachsender Entfernung schnell ab und ist schon in mäßigen Abständen so geringfügig, daß sie leicht durch andere Umstände überwogen werden kann. Denken wir sie uns derart vermehrt, daß sie noch für größere Abstände entscheidend in Betracht kommt, so würde sie dasjenige Verhalten darstellen, das wir einen regionären Zusammenhang nennen. Auch die normalen Wettstreitsverhältnisse können wir also nur in bedingtem Sinne örtlich unabhängig nennen; solche, die es in absoluter Weise wären, gibt es nicht; und der regionäre Zusammenhang stellt nur eine Steigerung eines auch normalerweise bestehenden Verhaltens dar.

Ein etwas stärkerer regionärer Zusammenhang dürfte wohl die Grundlage dessen bilden, was man als eine gewisse Beeinträchtigung oder Erschwerung des binokularen Sehens zu bezeichnen pflegt, so z. B. in den Fällen, wo die Vereinigung stereoskopischer Bilder etwas Mühe macht. In den Fällen der oben erwähnten Art ist übrigens der regionäre Zusammenhang kein absolut fixierter; so gelingt es, soweit meine Erfahrungen reichen, immer die Doppelbilder sichtbar zu machen, wenn man sich der oben erwähnten Schnurmethode bedient.

Es ist nun ohne weiteres ersichtlich, daß durch eine regionäre Gestaltung der Wettstreitsverhältnisse die bei Stellungsanomalien zu erwartenden Störungen in gewissem Maße beseitigt werden können. So würde insbesondere, wenn ein Zusammenhang dieser Art für die fovealen Gebiete besteht, eine Konfundierung der in geringer Exzentrizität gesehenen Objekte ausgeschlossen sein.

Die andere hier anzuschließende Modifikation normaler Sehweise ist diejenige, auf welche ich durch die Beobachtung der bei mir selbst bestehenden Verhältnisse geführt worden bin. Ich habe hierüber schon vor langer Zeit berichtet,[1] und bemerke zunächst, daß die damals beschriebenen Erscheinungen auch gegenwärtig noch ganz unverändert zu beobachten sind. Sie bestehen (ich beschränke mich hier auf die Anführung der vornehmlich interessierenden Punkte und verweise im übrigen auf meine frühere Mitteilung) im folgenden. Die überwiegend benutzte Sehweise ist die einer normalen Stellung und unterscheidet sich auch in bezug auf die Funktionen des binokularen Sehens nicht merklich von einer völlig normalen. Unter gewissen Umständen tritt dagegen eine Divergenzstellung ein, die sich auf etwa 14° beläuft. Die Divergenz ist in der Regel, namentlich wenn sie unabsichtlich eintritt und ich an die Art des Sehens gar nicht denke, von einer gewissen Exklusion begleitet, und zwar derart, daß beim Sehen naher Gegenstände das linke, bei entfernteren dagegen das rechte Gesichtsfeld überwiegt.[2]

[1] Archiv für Ophthalmologie. XXIV. 4, S. 117. 1878.

[2] So bin ich z. B. seit einer Reihe von Jahren gewohnt, beim Lesen das rechte Auge abweichen zu lassen. Beim Sehen in die Ferne hatte ich namentlich in früherer Zeit die Gewohnheit, das linke Auge abweichen zu lassen, weil das Aufhören der für die binokulare Fixation erforderlichen Konvergenzanstrengung auch eine vollständige Erschlaffung der Akkommodation begünstigte und somit das Sehen verbesserte.

Diese Exklusion ist nun aber keineswegs eine vollständige und zwingende. Sobald ich meine Aufmerksamkeit darauf richte, sind vielmehr, wenn in beiden fovealen Bezirken irgendwelche bemerkbaren Objekte vorhanden sind, die zu erwartenden Erscheinungen der Konfundierung sehr wohl zu bemerken. Hierbei tritt nun aber eine eigenartige und wie ich glaube für das Verständnis des Sehens der Schielenden sehr beachtenswerten Erscheinung auf. Diese besteht darin, daß, wenn ich die Aufmerksamkeit abwechselnd dem rechts- und dem linksäugig gesehenen Objekte zuwende, sie in verschiedener Richtung und zwar jede annähernd in der objektiv richtigen gesehen wird. Dabei besteht die Konfundierung (der Eindruck unmittelbarer Benachbarung der beiden Objekte) in völlig zwingender Weise weiter. Es kann also der ganze foveale Bezirk in zwei verschiedenen Richtungen gesehen werden.

Zwischen diesen beiden Sehrichtungen findet ein Wettstreitsverhältnis statt, welches mit dem Wettstreit der Sehfelder große Analogie besitzt; ich habe daher die ganze Erscheinung damals als einen Wettstreit der Sehrichtungen bezeichnet. Er hängt mit dem Wettstreit der Sehfelder auch in gewissem Maße zusammen; überwiegen die rechtsäugigen Objekte, so tritt im allgemeinen auch die rechte, d. h. die der tatsächlichen Stellung des rechten Auges entsprechende Sehrichtung in Geltung. Doch ist dieser Zusammenhang kein strenger und allgemeiner, wie eben die Konfundierungen lehren. Ein einigermaßen auffälliges mit dem rechten Auge gesehenes Objekt kann sehr wohl auch in linker Sehrichtung wahrgenommen werden, und erscheint demgemäß in die Wahrnehmungen des linken Auges fälschlich eingeordnet.

Wollen wir die hier vorliegende Sehweise in bezug auf ihr Verhältnis zur normalen und ihre Genese ganz zutreffend beschreiben, so können wir nicht sagen, daß eine Abänderung der ursprünglichen Korrespondenzbeziehungen stattgefunden habe. Vielmehr ist die hier eingetretene Veränderung zutreffend in erster Linie als eine Verdoppelung des Stellungsfaktors zu bezeichnen, derzufolge ein und derselbe Netzhautort zwei ganz verschiedene Richtungseindrücke auslösen kann.

Für die Art, wie diese in Wirksamkeit tritt, ist dann zu beachten, daß zwar überwiegend der eine für die rechtsäugigen, der andere für die linksäugigen Eindrücke bestimmend wird (so kommt es, daß in der Hauptsache rechts- wie linksäugige Eindrücke annähernd richtig lokalisiert werden) aber doch dieses Verhältnis nicht streng durchgeführt ist. Daher besteht denn in gewissem Umfange und unter geeigneten Bedingungen der zwingende Eindruck von Ortsbeziehungen wie sie der normalen Korrespondenz (bei einheitlichem Stellungsfaktor) entsprechen würden. So erklärt sich die Erscheinung, die bei Fixation zweier weit auseinander liegender Objekte eintritt und in der sich das wesentliche am prägnantesten konzentriert: wiewohl jedes dieser Objekte sobald ihm die Aufmerksamkeit zugewendet wird, annähernd an seiner richtigen Stelle, beide somit an ganz verschiedenen Orten gesehen werden, besteht doch daneben der zwingende Eindruck einer der normalen Korrespondenz entsprechenden unmittelbaren Benachbarung.

Es verdient dabei noch hervorgehoben zu werden, daß die Differenz der beiden Sehrichtungen keine dem Betrage nach konstante ist. Sie kann z. B., wenn ich willkürlich die Augen nicht ganz auseinander weichen lasse, sondern auf einem geringeren Divergenzgrade festhalte, beliebig kleiner gemacht werden.

Das Bestimmende dabei ist aber sicher weder die Stellung der Augen noch etwa die Innervation: ganz entsprechend vielmehr dem, was schon früher über die große Unsicherheit des Stellungsfaktors und seine Bestimmung durch empirische Momente hervorgehoben wurde, zeigt sich auch hier, daß der Unterschied der Sehrichtungen durch die gesehenen Objekte selbst bestimmt wird. Die Beschaffenheit der Gegenstände gibt ja im allgemeinen einen unmittelbaren Eindruck davon, wie weit das rechts- und das linksäugig fixierte Objekt auseinanderliegen, sowie von der Lage beider zum Körper. Diese empirische Bestimmung des Stellungsfaktors liegt offenbar seiner Verdoppelung zugrunde; und die empirischen Momente bestimmen daher wenigstens bei den Fällen dieser Art auch durchaus die Differenz des durch den einen und den anderen erzeugten Richtungseindruckes.

Hiermit hängt zusammen, daß, wenn ich in der von Tschermak angegebenen Weise in beiden Augen annähernd zentrale Nachbilder erzeuge, diese bei ganz verdunkeltem Auge stets unmittelbar benachbart (also mit demselben Stellungsfaktor) gesehen werden. Unter diesen Umständen tritt eine Verdoppelung überhaupt nicht ein. Dem entspricht auch, daß ich im Dunkeln oder bei geschlossenen Augen nicht einmal eine sichere Kenntnis davon habe, ob meine Augen parallel oder divergent stehen und ich auch nicht sicher imstande bin, die eine oder die andere Stellung willkürlich eintreten zu lassen. Nur das Sehen selbst und die dadurch gegebene Kontrolle gestattet mir die willkürliche Beherrschung der Divergenz.

Die eben dargelegten Verhältnisse sind in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung. Zunächst insofern, als sie uns in die Art und Weise, wie eine Änderung des normalen Sehens sich entwickeln kann, einen gewissen Einblick gewähren. Dies gilt schon für den regionär zusammenhängenden Wettstreit, in sehr viel wichtigerer Weise aber wohl für die Modifikation der Richtungsbeziehungen. In der Tat wird diese verständlich, wenn wir beachten, daß auch normalerweise der Richtungseindruck stets ein Ergebnis verschiedener Faktoren ist, daß neben dem Netzhautort der Stellungsfaktor in seine Bestimmung eingeht und daß dieser Teil des ganzen Zusammenhanges durch eine Verdoppelung des Stellungsfaktores den Angriffspunkt für eine Modifikation bietet.[1]

Sodann gestatten die hier gewonnenen Anschauungen, uns in den vielfach verwirrenden und scheinbar widerspruchsvollen Angaben der untersuchten Patienten einigermaßen zurecht zu finden. In der Tat kommt es vor (was für den Normalsehenden von vornherein ganz außer aller Berechnung liegen würde), daß verschiedene einander widersprechende, geometrisch unvereinbare Richtungseindrücke in zwingender Weise zwar nicht gleichzeitig, aber in einem gewissen Wettstreit miteinander vorhanden sind. Ein Patient von meiner Sehweise, und zwar ein ganz guter und sorgfältiger, aber nicht gerade physiologisch geschulter Beobachter, würde ohne Zweifel angeben, daß er zwei Objekte in ganz verschiedenen Richtungen dabei aber gleichwohl in unmittelbarer Nachbarschaft sehe, oder auch, daß er einen Gegenstand sowohl rechts wie links von einem anderen, aber doch nicht doppelt sehe usw.

Ganz vorzugsweise jedoch möchte ich die Bedeutung jener Tatsachen darin erblicken, daß sie uns hinsichtlich der Weiterentwickelung der hier zunächst in

[1] Auch Hering ist bei der Besprechung des von ihm untersuchten Falles zu einer ganz ähnlichen Auffassung in bezug auf die Entwickelung der anomalen Sehrichtungsbeziehung gelangt.

Anfängen dargelegten Verhältnisse gewisse Anhaltspunkte geben und damit die Fragen bestimmen, deren Beantwortung auf Grund der speziellen an schielenden Personen auszuführenden Untersuchungen vorzugsweise von Interesse ist. Auch wollen wir sogleich unter diesem Gesichtspunkt die besprochenen Verhältnisse noch etwas genauer verfolgen.

Vor allem in der Weise wird man an eine Weiterentwickelung der besprochenen Sehänderungen denken können, daß bei einer dauernden Stellungsanomalie auch die Verdoppelung des Stellungsfaktors (die bei mir ja nur zeitweilig besteht) eine dauernde sein wird. Zu einer ganz vollständigen Beseitigung aller falschen Lokalisationen würde es ferner erforderlich sein, daß durchgängig alle Eindrücke des rechten Auges mit dem einen, alle linksäugigen mit dem anderen lokalisiert würden, ein Verhalten also streng durchgeführt wäre, das bei mir, wie erwähnt, andeutungsweise gegeben ist. Eine weitere Annäherung an normale Sehverhältnisse würden wir ferner dann erhalten, wenn die Differenz der beiden Stellungsfaktoren von einem annähernd konstanten Betrage wäre. Wenn jeder Eindruck des rechten Auges mit einem, jeder des linken mit einem anderen, um einen bestimmten Betrag von jenem abweichenden Stellungsfaktor gesehen wird, so wird nun jeder Punkt des einen Auges nicht mehr dem ihm primär korrespondierenden, sondern einem um einen gewissen Betrag von diesem abstehenden (wie wir kurz sagen wollen) richtungsgleich sein. Es würde damit, wenigstens soweit die Sehrichtungen in Betracht kommen, eine Abänderung der Korrespondenz gegeben sein. Zum mindesten würde der hier in Betracht gezogene Zustand sich hinsichtlich der Sehrichtungen von dem einer modifizierten Korrespondenz (mit wiederum in normalerweise einheitlichen Stellungsfaktor) nicht mehr unterscheiden.

Es ist ein solcher Zustand, den Tschermak als eine anomale Sehrichtungsgemeinschaft bezeichnet hat. So erhebt sich also als erste Frage die, ob die Änderung der Richtungsbeziehungen zwischen rechts- und linksäugigen Eindrücken, die wir zunächst als eine von schwankendem Betrage und eine fakultative kennen, sich zu einer ausschließlichen, und zu einer solchen von annähernd festem Betrage entwickeln kann.

Neben dieser ergibt sich, in der Verfolgung der obigen Tatsachen, noch eine weitere Gruppe von Fragen. Ohne weiteres ist nämlich klar, daß bei einer derartigen Änderung der Richtungsbeziehungen, wie wir sie eben ins Auge faßten, eine Reihe von Störungen und Verwirrungen eintreten müßten, wenn der Wettstreit in seiner ursprünglichen Weise zwischen den primär korrespondierenden Stellen und als ein örtlich unabhängiger bestehen bliebe. Denn, wenn z. B. die Beschaffenheit der gesehenen Dinge es mit sich brächte, daß eine gewisse Stelle des rechten Auges und die ihr (sekundär) richtungsgleiche des linken, beide unterdrückt würden, so würde nun an der betreffenden Stelle des neugeordneten Gesichtsfeldes gar nichts gesehen werden; ebenso könnte es zu einer doppelten Wahrnehmung an derselben Stelle kommen. Auch für die Vermeidung derartiger Störungen lassen uns die oben mitgeteilten Beobachtungen einen Weg bereits erkennen, die regionäre Gestaltung des Wettstreites. Denken wir uns diese in größerem Umfange festgelegt, so würde dies schließlich dazu führen, daß zwar jedes Auge in richtiger Richtung sähe, zwischen beiden aber ein mehr oder weniger allgemeiner Ausschluß bestünde, so daß sie in der Hauptsache abwechselnd in Funktion träten, eine Sehweise,

die wir kurz eine **alternierende** nennen können. Störungen der erwähnten Art wären hiermit beseitigt; aber man sieht freilich, daß eine solche Sehweise von einer normalen sehr erheblich abweichen würde. Auf eine Reihe weiterer Fragen werden wir demgemäß geführt, wenn wir erwägen, ob nicht andersartige Modifikationen Platz greifen können, durch die jene geänderte Sehweise sich in höherem Grade der normalen nähern würde. Welches diese sein müßten, ist ohne weiteres anzugeben; es müßten nicht nur in betreff der Sehrichtungen, sondern auch in allen anderen Hinsichten (unter völliger Beseitigung der ursprünglichen) abgeänderte, neue Korrespondenzbeziehungen zwischen den beiden Augen sich ausgebildet haben. Außer der Richtungsgleichheit besteht ja nun diese Beziehung in einer Anzahl wohlbekannter funktioneller Verhältnisse, darin nämlich, daß die Eindrücke genau korrespondierender Stellen, sofern sie nicht übereinstimmen und demgemäß verschmelzen, sich entweder in der Form des Wettstreits ausschließen oder in der der binokularen Farbenmischung kombinieren; sodann darin, daß nicht genau korrespondierende Stellen zur Erzeugung von Tiefeneindrücken zusammen wirken. Ob also parallel mit der Änderung der Richtungsbeziehungen auch in all diesen Hinsichten sich neue abgeänderte Beziehungen zwischen rechtem und linkem Auge ausbilden, ob Fälle vorkommen, in denen wir demgemäß in ganz erschöpfendem Sinne von einer Neugestaltung der Korrespondenz reden dürfen, das wäre die weitere hier zu erhebende Frage Sie ist umso bedeutungsvoller, als die hier ins Auge gefaßte Änderung gegenüber dem, was wir durch die oben berührten Tatsachen als gesichert. betrachten dürfen, nicht nur eine graduelle Weiterentwickelung, sondern etwas Neues, und zwar, wie man wohl sagen darf, eine erheblich tiefergreifende Modifikation der normalen Beziehungen bedeuten würde.

Verweilen wir noch einen Augenblick bei der Betrachtung eines derartigen Zustandes. Zunächst sei darauf hingewiesen, daß, wenn wir uns ein Verhalten dieser Art aus dem, was wir als Verdoppelung des Stellungsfaktors kennen gelernt haben, in allmählichem Fortschritt entwickelt denken können, dagegen das andere der vorhin erwähnten Momente, der regionäre Zusammenhang des Wettstreites, hier gar nicht mehr ins Spiel kommen würde. Er müßte vielmehr sofern er etwa vorübergehend bestanden hat wieder ganz beseitigt sein und einem in der gewöhnlichen Weise örtlich unabhängigen, nur zwischen veränderten Punktpaaren, Platz gemacht haben.

Sodann ist hier hervorzuheben, daß eine sekundäre Korrespondenz in ihren Leistungen hinter der primären unter allen Umständen schon aus dem Grunde würde zurückbleiben müssen, weil von den beiden sekundär korrespondierenden Stellen eben mindestens eine mehr oder weniger exzentrisch gelegen sein und nur mit der geringen, diesen Stellen zukommenden Sehschärfe ausgerüstet sein würde. Der Vorzug der primären Korrespondenz, der in dem Zusammenwirken der beiden Stellen höchster Sehschärfe liegt, würde selbstverständlich hier unter gar keinen Umständen zu erreichen sein.

Endlich sei noch daran erinnert, daß wir uns mit einer sekundären Korrespondenz wohl auch ein bestimmtes Verhalten der Augenbewegungen verknüpft denken müßten, derart, daß derjenige Gegenstand, dem die Fixationsabsicht zugewendet ist, stets auf einer Fovea und der ihr sekundär korrespondierenden Stelle des anderen Auges abgebildet würde, ein Verhalten, das wir kurz eine modifizierte binokulare Fixation nennen wollen. Konvergenz bzw.

Divergenz der Blicklinien würde dabei in ganz der gleichen Weise, wie normal, mit der wechselnden Entfernung der gesehenen Gegenstände sich ändern; die Stellungsanomalie würde eine konstante, sich zu allen Augenstellungen algebraisch hinzufügende Modifikation darstellen.

Da es, wie aus dem Gesagten hervorgeht, für uns hier genügt, das sehr umfangreiche Beobachtungsmaterial unter diesen speziellen Gesichtspunkten zu betrachten, so beschränke ich mich darauf, hierunter die wichtigsten der einschlägigen Arbeiten anzuführen[1] und wende mich sogleich zu einer Besprechung der einzelnen Fragen, wobei auf die einzelnen Arbeiten nach Erfordernis Bezug zu nehmen sein wird.

Was zunächst die Verhältnisse der Sehrichtungen angeht, so lehren die Beobachtungen, daß anomale Richtungsbeziehungen zwischen rechts- und linksäugigen Eindrücken in größtem Umfange vorkommen. Sie lassen sich einerseits insofern nachweisen, als Objekte, die auf den beiden fovealen Gebieten abgebildet werden, in verschiedenen Richtungen, dann aber auch insofern, als die auf der Fovea des einen und die auf einer exzentrischen Partie des anderen Auges abgebildeten Gegenständen annähernd in derselben Richtung wahrgenommen werden, was, abgesehen von den später noch zu besprechenden Vereinigungen in der Form binokularer Farbenmischung, auch in der einfachen Art binokularer Konfundierung zu „Sammelbildern" bemerkbar wird.

Auch das unterliegt keinem Zweifel, daß in vielen Fällen die anomale Sehbeziehung eine relativ fixierte ist, und über die ursprüngliche (sofern diese überhaupt noch vorhanden ist) stark überwiegt. Dies geht insbesondere aus der Möglichkeit hervor, sie nach der von Tschermak bevorzugten Nachbildmethode nachzuweisen. Wenn, wie es hier der Fall ist, die auf der rechten und linken Fovea erzeugten Nachbilder, im verdunkelten Gesichtsfeld beobachtet, an stark verschiedenen Stellen wahrgenommen werden, so drückt sich hierin eine ganz sichere (von empirischen Momenten unabhängige) Ungleichheit der den beiden Stellen des deutlichsten Sehens zukommenden Sehrichtungen, aus.[2]

Auf große Schwierigkeiten stoßen wir dagegen schon, sobald wir fragen, ob die veränderte Beziehung der Sehrichtungen eine derart befestigte werden kann, daß die ursprüngliche neben ihr gar nicht mehr besteht, ob diese letztere wirklich vollständig unterdrückt und beseitigt ist. In der Regel ist

[1] Sachs, Über das Sehen der Schielenden. Archiv f. Ophth. XLIII. S. 597. — Derselbe, Über das Alternieren der Schielenden. Ebenda. XLVIII. S. 443. — Bielschowski, Untersuchungen über das Sehen der Schielenden. Ebenda. L. S. 406. — Tschermak, Über anomale Sehrichtungsgemeinschaft der Netzhäute bei einem Schielenden. Ebenda. XLVII. S. 508. — Schlodtmann, Studien über anomale Sehrichtungsgemeinschaft bei Schielenden. Ebenda. LI. S. 256. — Hering, Über die anomale Lokalisation der Netzhautbilder bei Strabismus alternans. Deutsches Archiv f. klin. Medizin. LXIV. S. 15. — Vgl. auch die von Hoffmann gegebene Zusammenstellung: „Die neueren Untersuchungen über das Sehen der Schielenden" in den Ergebnissen der Physiologie. I. 1902

[2] Die Nachbildmethode ist daher zweifellos sehr geeignet, zu prüfen, ob die anomalen Beziehungen ganz dominierend sind, und dies, wo es der Fall ist, in einer jeden Zweifel ausschließenden Weise darzutun. Dagegen ist sie keineswegs geeignet, eine nur fakultativ vorhandene Anomalie dieser Art bemerklich zu machen. So sehe ich z. B., wie oben schon erwähnt, Nachbilder, die den beiden Foveae naheliegen, im verdunkelten Gesichtsfelde stets unmittelbar benachbart (mit demselben Stellungsfaktor). Eine Anomalie dieser Art würde also mit der Nachbildmethode nicht nachweisbar sein.

dies zweifellos nicht der Fall. Wir finden vielmehr bei den Autoren die Angabe, daß Reste der ursprünglichen Sehbeziehungen sich fast in allen Fällen noch gelegentlich nachweisen lassen. Sie bestehen insbesondere in den bei mir noch so leicht bemerkbaren Konfundierungen des rechts- und linksäugigen fovealen Bezirkes, darin also, daß in Wirklichkeit stark richtungsverschiedene, vom rechten und linken Auge annähernd fixierte Gegenstände den Eindruck der Benachbarung machen. Gelingt es nun auch in manchen Fällen nicht, etwas Derartiges zu beobachten, so wird es doch schwer möglich sein, den Zweifel zu beseitigen, ob nicht bei günstiger Gestaltung der Versuchsmodalitäten und bei großer Übung des Beobachters Erscheinungen dieser Art doch einmal bemerkbar werden könnten. Ferner ist zu beachten, daß der in sehr vielen Fällen bestehende regionäre Wettstreit das Zustandekommen einer Konfundierung verhindern kann; ist ein solcher in ausgeprägter Weise vorhanden, so sind damit die Bedingungen, unter denen wir ein Auftreten der ursprünglichen Richtungsbeziehung erwarten könnten, überhaupt beseitigt und die Frage nach ihrer Existenz wird gegenstandslos. Wir werden also die Frage, ob eine vollständige Beseitigung der ursprünglichen Sehbeziehungen vorkommt, offen lassen und uns begnügen müssen, zu konstatieren, daß jedenfalls in zahlreichen Fällen die modifizierten sich als durchaus überwiegend festgesetzt haben.

Wir haben sodann weiter zu fragen, ob die Modifikation der Sehbeziehungen eine dem Betrage nach konstante werden kann, so daß wir jeder Stelle der rechten Netzhaut eine bestimmte Stelle der linken als sehrichtungsgleich zuordnen können. In erster Linie kann das in der Weise geprüft werden, daß man die Kombinition der Eindrücke von sekundär korrespondierenden Netzhautstellen des genaueren untersucht; und zwar wird zu prüfen sein, ob bei bestimmter Lage der Netzhautbilder der gleiche Richtungseindruck (demgemäß bei übereinstimmenden Bildern Verschmelzung) stattfindet, bei abweichenden aber die Ungleichheit der Richtung in der Form des binokularen Doppeltsehens bemerkbar wird. In dieser Hinsicht betonen die Beobachter, daß die sekundäre Korrespondenz stets eine wenig fixierte, vielmehr in erheblichem Betrage schwankende sei. Die Feststellung eines dem normalen ähnlichen Doppeltsehens gelingt im allgemeinen nicht; die rechtsäugige Abbildung z. B. des vom linken Auge (foveal) fixierten Objektes kann in erheblichem Betrage variiert werden, ohne daß die einheitliche Wahrnehmung aufhört (auch in Fällen, wo z. B. die binokulare Farbenmischung die Verwertung beider Eindrücke sicher stellt). Hiermit steht dann im Einklange, daß auch die Augenbewegungen sich niemals mit einer der normalen ähnlichen Präzision nach dem Abstande der fixierten Gegenstände richten, also auch eine modifizierte binokulare Fixation in der Regel nur in sehr grober Weise verwirklicht ist. Die Auffassung dieser Angaben stößt freilich, wie sich nicht verkennen läßt, auch auf gewisse Schwierigkeiten. Denn wie oben schon angedeutet, ist eine Präzision neuer Korrespondenzbeziehung, die der normalen auch nur annähernd gleichkäme, schon dadurch ausgeschlossen, daß jedesmal mindestens die eine der beteiligten Netzhautstellen eine exzentrische ist, und somit nur eine relativ geringe Sehschärfe besitzt. Ob die vorhin erwähnten Schwankungsbreiten über den hierdurch bedingten und erklärten Betrag hinausgehen, läßt sich in Ermangelung quantitativer Angaben mit Sicherheit nicht sagen. Als wahrscheinlich wird es meines Erachtens immerhin gelten können, da schon bei der

Natur der hier angewandten Methoden wohl meist ziemlich erhebliche Verschiebungen geprüft worden sind.

Wenden wir uns zu den Verhältnissen binokularen Zusammenwirkens, so lehren die Beobachtungen, daß in diesen Hinsichten die Verhältnisse ungemein verschieden sein können, und man hat angefangen, daraufhin die Strabismen in verschiedene Gruppen zu sondern. In gewissen Fällen geht die Entwickelung offenbar in der Richtung, daß ein regionärer Zusammenhang des Wettstreites sich mehr und mehr befestigt. Insbesondere wenn bestimmte Gründe (wie einseitige Amblyopie) dem einen Auge ein dauerndes Übergewicht verschaffen, entwickelt sich das Sehen zu einem wesentlich einäugigen, ein Fall, der für uns von keinem besonderen Interesse ist. In anderen Fällen nähert sich die Sehweise offenbar einer alternierenden. Ob hier die Exklusion jemals zu einer ganz zwingenden wird, dürfte sich einer sicheren Antwort auch entziehen. In den meisten Fällen, wie oben schon erwähnt, sind Konfundierungen noch zu beobachten, die neben einem Bestehen der ursprünglichen Sehrichtungsbeziehung auch eine nicht ganz strenge Geltung des regionären Wettstreites anzeigen. Neben diesen Fällen gibt es nun aber auch andere, in denen ein solches Alternieren sich nicht ausbildet, vielmehr eine gleichzeitige Benutzung beider Augen stattfindet. Diese sind für uns die interessantesten, und an ihnen werden wir die Frage ins Auge zu fassen haben, ob außer der veränderten Sehrichtungsbeziehung nun auch jene anderen mit der Korrespondenz zusammenhängenden Funktionen (Wettstreit, binokulare Farbenmischung, Tiefenwahrnehmung) sich in einer abgeänderten Weise zwischen anderen, als den primären korrespondierenden Punktpaaren, neu entwickeln können. Was nun diese Verhältnisse anlangt, so sind nicht ganz selten Erscheinungen von binokularer Farbenmischung angegeben worden,[1] und es kann an dem tatsächlichen Vorkommen einer solchen (für sekundär korrespondierende Netzhautstellen), wohl nicht gezweifelt werden. Ein helles Objekt, im einem Auge foveal, im anderen exzentrisch abgebildet, erscheint nur einfach und ändert seine Farbe, wenn vor das Schielauge ein farbiges Glas gebracht wird.

Ganz besonderes Interesse ist in den letzten Jahren der anderen hier zu erwähnenden Funktion des binokularen Sehens, der Tiefenwahrnehmung, zugewendet worden. Die Prüfung derselben, wie sie hier erforderlich ist, unter Ausschluß der sogenannten empirischen Momente (und insbesondere auch der Augenbewegungen) ist ohne große Schwierigkeit z. B. mit dem Heringschen Fallapparat möglich, und in sehr zahlreichen Fällen ausgeführt worden. Die Untersuchungen lehren, daß binokulare Tiefenwahrnehmung zwar in der überwiegenden Mehrzahl von Fällen vermißt wird, in einigen wenigen aber doch zweifellos bestanden hat. So insbesondere in dem einen der von Bielschowski beschriebenen Fällen, a. a. O. S. 447. Auch in dem von Hering beschriebenen Falle war eine binokulare Tiefenlokalisation nachweisbar.

Was endlich die letzte hier zu berührende Frage anlangt, ob primär korrespondierende Teile unter Beseitigung ihrer ursprünglichen Wettstreitsbeziehung völlig unabhängig voneinander geworden sind, so ist es hier ganz besonders schwierig, zu einem einwandsfreien Ergebnis zu gelangen. Allerdings finden wir vielfach die Angaben, daß die mit dem rechten und linken Auge

[1] Sachs, Archiv f. Ophthalm. XLVIII. S. 444. Bielschowski, ebenda. L. S. 445.

fixierten Objekte zugleich und in verschiedenen Richtungen wahrgenommen werden. Doch läßt sich mindestens gegen einen Teil dieser Beobachtungen das Bedenken erheben, daß die gleichzeitig gesehenen nicht beide streng fixiert, oder allgemein gesagt, nicht mit streng korrespondierenden Punkten gesehen sein mögen. Ob es möglich ist, diesen Schwierigkeiten durch die Anforderung ganz exakter Fixation, oder durch die lückenlose Wahrnehmung ausgedehnter Objekte zu beseitigen, ist einigermaßen fraglich. Sodann aber ist zu beachten, daß es nicht leicht sein wird, aus den Angaben ungeübter und mit diesen physiologischen Verhältnissen nicht vertrauter Beobachter sicher zu entscheiden, ob die beiden Wahrnehmungen wirklich gleichzeitig, oder in Form eines Wettstreites alternierend stattfinden. Es wird das um so mehr der Fall sein, als es unter allen Umständen, auch wo keinerlei Wettstreitsverhältnisse ins Spiel kommen, mindestens für ungeübte Beobachter mit einigen Schwierigkeiten verknüpft ist, die Aufmerksamkeit zwei an verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes gelegenen Objekte gleichzeitig zuzuwenden, und ihre gleichzeitige Wahrnehmung außer Zweifel zu stellen.

Einen genügenden Nachweis für die gleichzeitige Wahrnehmung zweier primär korrespondierenden Bezirke könnte man vielleicht geneigt sein in der Beobachtung Schlodtmanns zu erblicken, dem es zu ermitteln gelang, wie sich die Sehschärfe eines normalen Bezirkes ändert, je nachdem die Fixationsabsicht auf dem betreffenden oder dem anderseitigen Auge ruhte. Eine solche Beobachtung, so kann es scheinen, wäre bei einem alternierenden Sehen ganz ausgeschlossen gewesen. Jedoch wird gerade hier fraglich bleiben, ob der linksäugig fixierte Punkt mit dem rechtsäugigen, dessen Sehschärfe kontrolliert wurde, wirklich genau korrespondierte oder ihm nur nahe benachbart war.

Es ist hier endlich noch kurz derjenigen Erscheinungen zu gedenken, die nach der operativen Richtigstellung schielender Augen beobachtet werden. Sind die anomalen Richtungsbeziehungen so fixierte, wie wir dies dem obigen zufolge wenigstens für eine Anzahl von Fällen annehmen müssen, so läßt sich erwarten, daß bei einer operativen Richtigstellung der Augen zunächst Störungen durch Diplopie und Konfundierung (ganz ähnlich wie bei einer Muskellähmung) sich einstellen werden. Daß dies in der Tat der Fall sei, ist schon von Helmholtz angegeben, und es ist durch die späteren Untersuchungen in großem Umfange bestätigt worden. Auch hier jedoch komplizieren sich die Verhältnisse, sobald wir die Details des genaueren ins Auge fassen. Denn mit großer Übereinstimmung wird doch betont, daß diese Störungen verhältnismäßig schnell schwinden und (sofern keine anderen Hindernisse dem entgegenstehen) ein normales binokulares Sehen sich mit überraschender Schnelligkeit herstellt.

Überblicken wir die im obigen zusammengestellten Tatsachen, so erhellt etwa folgendes. Sehr häufig ändert sich bei dauernden Stellungsanomalien die Beziehung zwischen den den rechts- und linksäugigen Bildern zukommenden Richtungseindrücken; es entwickelt sich eine abgeänderte Richtungsbeziehung. In dieser Hinsicht haben also die späteren Untersuchungen in vollem Maße das bestätigt, was Helmholtz auf Grund eines damals noch dürftigen Beobachtungsmaterials geschlossen und (mit vollem Recht) als Tatsache von hoher theoretischer Bedeutung hervorgehoben hatte. Die Verdoppelung des Stellungsfaktors und der damit verknüpfte Wettstreit der Sehrichtungen, wie ich sie beschrieben habe, gewähren auch in die Art, wie sich ein derartiger Zustand entwickelt

einen deutlichen Einblick. In einem eingeschränkten Sinne darf ein solcher Zustand wohl als eine Neugestaltung der Korrespondenzverhältnisse bezeichnet werden, wenn auch die veränderte Sehrichtungsbeziehung sich stets durch eine beträchtliche Schwankungsbreite von der normalen unterscheidet, überdies auch fraglich bleibt, ob es jemals zu einer ganz vollständigen Beseitigung dieser letzteren kommt. Was die Verhältnisse des binokularen Zusammenwirkens anlangt, wie wir sie an den primär korrespondierenden Stellen kennen, so entwickeln sie sich für die sekundär korrespondierenden meistens nicht. Doch ist nicht zu bestreiten, daß sie in seltenen Fällen doch vorkommen (sowohl binokulare Farbenmischung wie binokulare Tiefenwahrnehmung) wenn auch namentlich die letztere in relativ unvollkommener Weise. Ob der Wettstreit zwischen den primär korrespondierenden Stellen vollkommen beseitigt werden kann, entzieht sich einer einwandsfreien Feststellung.

Im ganzen wird man danach den Eindruck gewinnen, daß die Korrespondenz eine funktionelle Beziehung darstellt, die für die primär korrespondierenden Punktpaare in irgendeiner Weise besonders begünstigt, aber doch nicht streng festgelegt ist, so daß sie auch für andere Punktpaare, wenn auch mit einigen Schwierigkeiten und in geringerer Vollkommenheit entwickelt werden kann. Und zwar scheint eine solche Abänderung sich hinsichtlich der Richtungseindrücke noch verhältnismäßig leicht, schwieriger in bezug auf die anderen Verhältnisse binokularen Zusammenwirkens auszubilden.

4. Über Erlernen und Verlernen des Sehens.

Verhältnismäßig kurz können wir den nächsten hier anzuschließenden Punkt erledigen, das Sehenlernen der operierten Blindgeborenen, da die neueren Mitteilungen hierüber zwar ziemlich zahlreich sind, aber kaum etwas anderes gelehrt haben, als was schon die älteren von Helmholtz im Texte ausführlich besprochenen Berichte enthielten. Eine Anzahl späterer hierhergehöriger Arbeiten führe ich unten mit ihren Titeln an.[1] In der erstgenannten Arbeit Uhthoffs ist die ältere Literatur (vor 1891) angeführt.

Alle Beobachtungen zeigen (und dies ist es wohl, was vor allem das Sehen des frisch operierten zu einem so überaus unvollkommenen macht), daß eine optische Erkennung bestimmter, im übrigen bekannter Gegenstände zunächst nicht möglich ist und erst sehr allmählich (im Laufe von Wochen) erlernt wird. Es ist dies eine Tatsache, die in erster Linie wohl von allgemeiner psychologischer Bedeutung ist, sofern sie lehrt, daß hier, wie überall, die gedächtnismäßige Festhaltung zusammengesetzter, eine Anzahl von Einzelheiten enthaltender Eindrücke eine Sache wiederholter Wahrnehmung und eines hierauf beruhenden Erlernens ist. Mit Rücksicht auf das, was wir primitiven, noch durch keine Erfahrung ausgebildeten räumlichen Bestimmungen zutrauen dürfen, ist es nicht

[1] Uhthoff, Untersuchungen über das Sehenlernen eines siebenjährigen blindgeborenen und mit Erfolg operierten Knaben. Beiträge zur Psychologie usw. Helmholtz-Festschrift. 1891. — Derselbe, Zeitschrift f. Psychologie. XIV. S. 197. — Francke, Das Sehenlernen eines 26jährigen intelligenten Blindgeborenen. Beiträge zur Augenheilkunde. XVI. 1894. — Schlodtmann, Optische Lokalisation bei Blindgeborenen. Archiv f. Ophth. LIV. S. 256. 1903. — Schanz, Zeitschrift f. Augenheilkunde. XII. S. 753. — Latta, Notes on a case of successfull operation for congenital cataract in an adult. Brit. journal of psychology. I. S. 135. 1905.

ohne Interesse, daß selbst ganz einfache Formen zu Anfang nicht erkannt werden (S. z. B. bei UHTHOFF, Zeitschrift f. Psychol. XIV. S. 209.)

In speziell optischer Hinsicht ist sodann von Interesse vor allem die große Unsicherheit der Entfernungswahrnehmung (der von UHTHOFF beobachtete Knabe griff noch 2 Monate nach der Operation nach einem 1.5 m entfernten Gegenstand[1]); ferner, was ohne Zweifel damit in Zusammenhang steht, die entsprechende Unsicherheit der Größenbeurteilung. Die große Rolle, die die Erfahrung in diesen Hinsichten spielt, wird durch diese Tatsachen sehr anschaulich erläutert. Besonders beachtenswert ist wohl, daß die ganzen eigentümlichen Beziehungen zwischen Größe und Anordnung, wie sie auf der ungleichen Entfernung beruhen, die Einschließung des (entfernteren) größeren Gegenstandes durch einen kleineren nahen, als etwas Neues erlernt werden muß.

Kurz mag hier noch auf ein, in mancher Hinsicht ähnliches, neuerdings bekannt gewordenes Erscheinungsgebiet hingewiesen werden, das Verlernen des Sehens durch sehr langen Nichtgebrauch. Sind die Augen eines Kindes z. B. durch Blepharospasmus für Jahre außer Funktion gesetzt, so muß nach Beseitigung jenes Zustandes das Sehen in gewissem Maße neu erlernt werden und die hier beobachteten Erscheinungen haben mit denjenigen, die bei operierten Blindgeborenen bemerkt werden, große Ähnlichkeit.[2]

5. Über die physiologischen Grundlagen des Urteilens und Erlernens.

Ich wende mich zu der Besprechung gewisser allgemeiner, das Entstehen von Bewußtseinserscheinungen und seine Abhängigkeit von physiologischen Vorgängen betreffender Verhältnisse, die, wie oben bemerkt, für die Auffassung der Lokalisation und ihrer Gesetze von Bedeutung sind. Wir können das hier zu sagende zweckmäßig an gewisse Bedenken knüpfen, die einer empiristischen Theorie in großem Umfange entgegengestellt worden sind. Wenn es auf einer Erlernung beruht, daß z. B. ein mit einer gewissen Querdisparation gesehener Punkt uns den Eindruck macht, in größerer Entfernung als der Fixationspunkt zu liegen, so scheint sich dieser Eindruck als ein auf Grund einer allgemeinen Erfahrung gefälltes Urteil herauszustellen. Im Gegensatze hierzu ist man gewohnt zu betonen, daß die örtlichen Bestimmungen der gesehenen Dinge unserem Bewußtsein in genau der gleichen Weise gegeben sind, wie ihre im engeren Sinne optischen Qualitäten (Farbe und Helligkeit), daß demgemäß keine Berechtigung vorliege, sie von jenen als etwas grundsätzlich verschiedenes zu sondern, daß sie vielmehr gleich jenen unbedingt als Empfindungen in Anspruch zu nehmen seien. So erhebt sich als eine Frage, zu der wir Stellung nehmen und deren Bedeutung wir klarlegen müssen die, ob wir die räumlichen Bestimmungen unserer Seheindrücke als Urteile oder als Empfindungen zu bezeichnen haben.

Auf den ersten Blick könnte man meinen, daß es sich hier um eine Frage der Benennung handle, die eine bestimmte Entscheidung nicht gestattet, daß

[1] HELMHOLTZ-Festschrift. S. 156.

[2] UHTHOFF, Beitrag zur vorübergehenden Amaurose nach Blepharospasmus. Sitzungsberichte der Marburger Gesellschaft zur Bef. d. ges. Naturw. S. 1—68. 1891. — SILEX, Eigenartige Sehstörungen nach Blepharospasmus. Archiv f. Psychiatrie. XXX. S. 270. 1898. — LOBANOW, Verlernen des Sehens durch Katarakt-Erblindung. Klin. Monatsblätter für Augenheilkunde. XXXVIII.

es Sache eines einigermaßen willkürlichen Übereinkommens sei, ob wir in der einen oder anderen Weise verfahren. Der psychische Tatbestand, daß wir einen Gegenstand gerade vor uns, daß wir einen entfernter als einen anderen sehen: er ist sicherlich verschieden sowohl von dem reinen typischen Empfinden, das etwa stattfindet, wenn ein Riechstoff auf unser Geruchsorgan einwirkt, wie auch von dem typischen Urteilen, wie es vorliegt wenn wir sagen: es wird bald regnen. Ob wir die erste oder die zweite Kategorie derart erweitern wollen, daß die optischen Wahrnehmungen ihr eingefügt werden können, scheint einigermaßen willkürlich und höchstens unter Gesichtspunkten der Zweckmäßigkeit bestimmbar zu sein. Die genauere Prüfung zeigt indessen, daß sich die Entscheidung im einen oder anderen Sinne in der Regel auf ganz bestimmte allgemeine Anschauungen gestützt hat; und diese sind es, deren Verfolgung doch eine sehr greifbare Bedeutung besitzt und nicht ohne Nutzen ist.

Überblicken wir die in bezug auf die vorliegende Frage beigebrachten Argumentationen, so stellt sich zunächst heraus, daß sie nach zwei ganz verschiedenen Gesichtspunkten beurteilt werden kann und auch beurteilt worden ist, nämlich einerseits nach der psychologischen Qualifikation der räumlichen Bestimmungen, nach dem was sie sind und bedeuten, andererseits aber nach der Art ihrer Entstehung, der Art insbesondere wie sie ins Bewußtsein treten.

Folgen wir dem ersteren Gesichtspunkt, richten wir also, von dem Entstehungsmodus ganz absehend, unsere Aufmerksamkeit auf die Natur der betreffenden Erscheinung selbst, insbesondere auch ihre Zusammengesetztheit oder Einheitlichkeit, das an oder in ihr unterscheidbare usw., so ist es unbestreitbar, daß das Sehen eines Gegenstandes an einem bestimmten Orte schon nach Maßgabe dessen, was der Raum uns überhaupt bedeutet, ein Moment der Objektivierung enthält, das Gesehene dem Subjekt gegenüberstellt, daß es eine Überzeugung oder (wenn man lieber will) der Eindruck eines nicht das Subjekt selbst, sondern die äußeren Dinge, das „Nicht-Ich" betreffenden tatsächlichen Verhaltens darstellt, daß es somit hinsichtlich seines eigentlichen Inhaltes all dem, was wir sonst Urteil zu nennen gewohnt sind, vollkommen gleich steht.

Zu einem anderen Ergebnis kommt man, wenn man, dem anderen vorhin erwähnten Gesichtspunkt folgend, die Art der Entstehung als maßgebend in Betracht zieht. Hier wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß die Urteile durch vorausgehende in unserem Bewußtsein aufweisbare Vorgänge bedingt sind; sie erscheinen als das Ergebnis einer Erwägung, Betrachtung usw., wobei im allgemeinen die Tendenz zur Bejahung und Verneinung beide in gewissem Maße bemerkbar sind und in dem Überwiegen und Obsiegen des einen schließlich das Urteil besteht. Im Gegensatze hierzu scheinen die Empfindungen direkt als Ergebnis physiologischer Bedingungen ins Bewußtsein zu treten. So wird denn die Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit des Eintretens als maßgebendes Kriterium herausgehoben und alles, was in dieser Hinsicht sich den einfachen typischen Empfindungen gleich verhält, auch als Empfindung bezeichnet. Dieses Prinzip ist von den neueren physiologischen Autoren überwiegend akzeptiert worden; ihm folgend hat z. B. Exner in gewissen Fällen von einem Empfinden der Bewegung (gesehener Gegenstände) gesprochen.

Mir scheint nun, daß wir es hier mit einem Prinzip zu tun haben, das nur unter einer ganz bestimmten Voraussetzung durchführbar sein würde, einer

Voraussetzung, die sich mit einer in älteren Zeiten wohl tatsächlich vertretenen Anschauung deckt; und es ist möglich, daß diese Anschauung auch gegenwärtig noch, wenn auch nur stillschweigend und nicht vollkommen deutlich, jener Unterscheidung vielfach zugrunde liegt. Sie kann kurz etwa dahin charakterisiert werden, daß die Einwirkung des Körpers auf die Seele in der Erzeugung der Empfindungen bestünde, die demnach für das Seelenleben das unmittelbar gegebene darstellen würden, während alle höheren und verwickelteren psychischen Gebilde, so auch namentlich die Urteile, nach den ganz andersartigen und selbständigen Gesetzen des Seelenlebens erzeugt und bestimmt würden. Wäre dies der Fall, so wäre für eine ihrer psychischen Art nach definierte Klasse und nur für sie auch der Modus der Entstehung ein fest bestimmter: die Charakterisierung nach den beiden hier erwähnten Gesichtspunkten, psychische Natur und Entstehungsart, würde zusammenfallen. Ein Überblick der bekannten Tatsachen läßt nun meines Erachtens keinen Zweifel darüber bestehen (und eben hierin liegt, wie ich glaube, eine Tatsache von grundlegender Bedeutung), daß sich dies **nicht** so verhält, daß nicht bloß eine bestimmte, psychologisch einheitliche Klasse von Bewußtseinserscheinungen in der für die Empfindungen angenommenen Weise an lediglich physiologisch bezeichenbare (durch Bewußtseinskorrelate nicht charakterisierte) Bedingungen geknüpft ist, sondern daß ganz das gleiche auch in größtem Umfange für höhere und verwickeltere psychische Erscheinungen, insbesondere auch für ganz typische Urteile gilt.

Hierher gehört schon der zwingende Eindruck eines sich bewegenden **Gegenstandes**, der entsteht, wenn eine bestimmte optische Besonderheit durch das Gesichtsfeld fortschreitet, wie es z. B. der Fall ist, wenn zwei sich kreuzende Gitter sich gegeneinander verschieben. In ganz unzweideutiger Weise zeigen ferner das gleiche diejenigen Erscheinungen, die in der Psychologie herkömmlicherweise als **Rekognitionsurteile** bezeichnet werden. Die Verknüpfung des im Augenblicke gegebenen sinnlichen Eindruckes mit einem erfahrungsmäßig ausgebildeten Begriffe, dem wir ihn unterordnen, erfolgt im allgemeinen nicht minder prompt und unmittelbar wie das Empfinden selbst. Mit dem süßen Geschmacke ist auch die Unterordnung unter den empirischen Begriff meist ohne weiteres gegeben. Es handelt sich dabei in vielen Fällen (insbesondere z. B. bei den Farben) um Begriffe, die nicht Zustände des empfindenden Subjekts, sondern Eigenschaften der Gegenstände selbst bedeuten. Wir sehen etwas Weißes oder Rotes, Helles oder Dunkles usw. und die Empfindung wird mit dem betreffenden Begriffe in einer so zwingenden Weise verknüpft, daß wir sie uns ohne eine solche Einreihung nur schwer vorzustellen vermögen.

Ganz das gleiche wie für die Rekognition solcher einfacher Qualitäten gilt auch für die Wiedererkennung ganzer erfahrungsmäßig bekannter Gegenstände. Der Eindruck, daß wir eine Katze laufen, oder ein Pferd stehen sehen, daß wir eine bestimmte Person sprechen hören, entsteht in uns genau so unmittelbar wie der, daß sich vor uns etwas bewege, daß irgendwo ein schwarzer oder roter Gegenstand sei usw.

Wo und in welcher Weise dieses Gebiet seine Grenze finden mag, darf hier unerörtert bleiben; das angeführte genügt um zu zeigen, daß wir jenes Prinzip (alles unmittelbar physiologisch begründete als Empfindung zu bezeichnen nicht durchführen können, ohne uns mit dem Sprachgebrauch in einen verhängnis-

vollen und durchaus unangängigen Widerspruch zu setzen. Wir müssen vielmehr ganz einfach konstatieren, daß auch Urteile, sogar solche, die sich in zweifellos empirisch erworbenen Begriffen bewegen, in einer eigenartigen Weise direkt durch physiologische Verhältnisse bestimmt werden und als etwas unmittelbar gegebenes fertig und zwangsmäßig ins Bewußtsein treten können.

Die hiermit gewonnene Anschauung ist nun deswegen von Bedeutung, weil die Vorgänge, auf die sie uns hinweist, eigenartigen Gesetzen folgen und daher für eine ganze Reihe von Tatsachen gerade die Einsicht, daß wir es hier mit einem besonderen Gebiete physiologischen Geschehens zu tun haben, den Ausgangspunkt jedes richtigen Verständnisses bilden muß. Es wird genügen, hier an einige solcher Eigentümlichkeiten zu erinnern.

Eine erste besteht in dem springenden Wechsel, dem die hier in Betracht kommenden Zusammenhänge unterworfen sind. Sehr bekannt ist, wie der zwingende Eindruck, daß wir selbst uns bewegen, in den anderen umschlagen kann, daß wir stillstehen und die gesehenen Gegenstände in Bewegung sind. Ein ähnliches Umschlagen der Entfernungseindrücke findet beim Betrachten der sogen. Schroderschen Treppenfigur statt, besonders wenn man sie dreht. Endlich sei hier an die Erscheinungen erinnert, die beim Betrachten der sogen. Vexierbilder zu bemerken sind. Nach längerem Betrachten erkennen wir in der Regel plötzlich den „versteckten“ Gegenstand. Haben wir ihn aber einmal gesehen, so sehen wir ihn auch dauernd, und es gelingt uns nicht leicht, die frühere Sehweise wieder herzustellen. Alle diese Erscheinungen lassen erkennen, wie einem Eindruck, der uns als ein unmittelbar gegebener zum Bewußtsein kommt und sich hierdurch als ein direkt physiologisch bedingter ausweist, doch ein physiologischer Mechanismus besonderer Art vorgeschaltet ist, der sich durch jene Eigentümlichkeit seiner Funktion verrät.

Der zweite hier zu erwähnende Punkt ist der, daß die in der angegebenen Weise unmittelbar hervorgerufenen Urteile mit unserem eigentlichen Wissen in Widerspruch kommen können. Wir können es wissen, daß ein Gegenstand an seinem Orte verharrt und gleichwohl den zwingenden Eindruck haben, daß er sich bewegt; wir können es wissen, daß jemand nicht anwesend ist, und gleichwohl den Eindruck haben ihn reden zu hören. Die Urteile der einen und anderen Art sehen wir also in einem Verhältnis stehen, das innerhalb der uns vorzugsweise geläufigen, bewußt begründeten nicht möglich sein würde. Es drückt sich hierin eine gewisse Unabhängigkeit der einen und anderen Urteile, vielleicht eine Duplizität ihrer physiologischen Substrate aus, Verhältnisse, die ohne Zweifel von großer Bedeutung sind, wenn es auch verfrüht wäre, sie zum Ausgangspunkt spezieller Hypothesen zu machen.

Endlich müssen wir hier an die früher schon erwähnte,[1] viel beachtete Tatsache erinnern, daß die in unmittelbarer Weise physiologisch erzeugten Eindrücke nicht selten untereinander widersprechend sind. Wie wir oben sahen und auch im Hinblick auf die allgemeine Bedeutung solcher Verhältnisse als besonders wichtig hervorhoben, kann es z. B. vorkommen, daß wir den zwingenden Eindruck haben, daß ein Gegenstand sich bewegt, daß wir ihn aber gleichwohl am Ende des betreffenden Zeitraumes an der nämlichen Stelle sehen wie zu Anfang. Die Erscheinungen dieser Art waren es, die Fleischl in der

[1] S. o. S. 227 und 322.

Statuierung zusammenfaßte, daß die Gesetze der Logik für unmittelbare Empfindungen keine Gültigkeit haben, eine geistreich zugespitzte aber nicht gerade einwandsfreie Formulierung. Auf der Grundlage unserer obigen Betrachtung werden wir sagen, daß für die hier in Betracht kommenden physiologischen Vorgänge ein innerer Zusammenhang, wie wir ihn an unseren bewußten Denkvorgängen kennen, entweder gar nicht oder doch nicht in genau entsprechender Weise besteht. Wir haben hiermit für diese Klasse von Tatsachen den meines Erachtens zutreffenden Ausdruck gewonnen; auch verlieren die betreffenden Erscheinungen, so betrachtet, den Schein des rätselhaften und paradoxen, der ihnen zunächst anhaftet. Denn in der Tat haben wir ja keinerlei Berechtigung zu erwarten, daß für jene physiologischen Vorgänge genau gleiche oder analoge Regeln gelten, wie für die ganz andersartigen, die die Substrate der bewußten Denkvorgänge sein mögen. Nehmen wir z. B. an, daß das Gleiten der Netzhautbilder in direkter Weise den Eindruck einer Bewegung auszulösen vermag, so ist es nicht befremdend, daß dieser von den zu Anfang und Ende eines Zeitraumes gegebenen Ortswerten mehr oder weniger unabhängig ist und gelegentlich zu ihnen in Widerspruch kommen kann.

Es dürfte zweckmäßig sein, das hier zunächst nur allgemein dargelegte durch die Anwendung auf einige besondere Fälle noch besser ins Licht zu setzen. Ein Gegenstand für den, wie ich glaube, die Beachtung der hier erörterten Verhältnisse von großer Bedeutung ist, sind die Erscheinungen des Helligkeits- und Farbenkontrastes. Wie ich an anderer Stelle auseinandergesetzt habe,[1] ist es durchaus geboten, bei der Deutung dieser Erscheinungen die große und eigentümliche Variabilität der Rekognitionsurteile gerade in diesem Gebiete in Betracht zu ziehen. Wir können insbesondere die Helmholtzsche Auffassung derselben als „Urteilstäuschungen" nur richtig verstehen, indem wir die eigentümlichen physiologischen Bedingungen solcher Urteile in Betracht ziehen. Wie weit die Bedeutung dieser Verhältnisse sich erstreckt, entzieht sich zwar auch gegenwärtig noch durchaus einer sicheren Beurteilung; zweifellos aber ist es nicht angängig (wie dies bei der Bestreitung der Helmholtzschen Kontrasttheorie vielfach geschehen ist), in dem zwingenden Eindruck, an einer Stelle jetzt einen weißen, jetzt einen grauen Gegenstand zu sehen, einen genügenden Beweis dafür zu erblicken, daß die Empfindung sich geändert habe. Es heißt dies die Kompliziertheit, die den physiologischen Bedingungen solcher Urteile ohne Zweifel zukommt, gänzlich unterschätzen; es wird dabei stillschweigend von der Voraussetzung ausgegangen, daß diese Bedingungen ganz einfache, daß diese Rekognitionsurteile immer richtige seien.

Es muß hier zur Vermeidung von Mißverständnissen und zur Klärung der literarischen Sachlage hinzugefügt werden, daß der Hauptgegner der Helmholtzschen Kontrasttheorie, Hering, in späterer Zeit selbst auf diese Verhältnisse, sogar mit besonderem Nachdruck hingewiesen hat. So hat er insbesondere den eigentümlichen Umschlag geschildert,[2] der stattfindet, wenn eine (objektiv) dunklere Stelle in hellerer Umgebung zunächst als Fleck, dann aber, etwa zufolge einer Verschiebung, als ein auf die Fläche fallender Schatten ge-

[1] Nagels Handbuch der Physiologie. III. S. 240.

[2] Hermanns Handbuch der Physiologie. III. S. 574. Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn in Gräfe-Sämischs Handbuch der Augenheilkunde. Kap. XII. S. 8.

sehen wird, also zuerst den Eindruck eines mit der Umgebung gleichbeleuchteten Grau, dann den eines (beschatteten) Weiß macht. HERING hat, wie es scheint nicht bemerkt oder sich darüber getäuscht, daß die Tatsachen, die er hier mit vollem Recht als beachtenswert betont, eben diejenigen sind, die HELMHOLTZ seiner Kontrasttheorie zugrunde legte, und deren Anerkennung uns nötigt, diese Theorie in großem Umfange als eine mindestens mögliche anzuerkennen, und daß sie der früher von HERING geführten Bekämpfung dieser Theorie, die in der Behauptung gipfelte, daß sie schwarz in weiß verkehre, den Boden entziehen. Lehren doch eben die hier von HERING herangezogenen Tatsachen, daß wirklich ohne Änderung der Empfindung der zwingende Eindruck des Grau in den des Weiß umschlagen kann.

Der Einblick in diese Verhältnisse wird in gewisser Weise durch den Umstand erschwert, daß HERING auch bei diesem Umschlagen von einer Änderung der Empfindung spricht.[1] Es zeigt sich aber meines Erachtens gerade hier, daß diese Bezeichnung irreführend und wenig zweckmäßig ist. Denn darüber kann ja kein Zweifel bestehen (die Selbstbeobachtung lehrt dies in unzweideutiger Weise), daß, wenn der Eindruck aus dem eines Fleckes in den eines Schattens umschlägt, irgend etwas an ihm oder in ihm doch sich unverändert erhält. Dies heben wir in zutreffender Weise hervor, wenn wir sagen, es sei die eigentliche Empfindung unverändert geblieben, dagegen ihre Verknüpfung mit empirischen Begriffen (die dabei sehr wohl als physiologischer Vorgang aufgefaßt und von einem Wissen im gewöhnlichen intellektuellen Sinne unterschieden werden kann), in eigentümlicher Weise modifiziert worden. Wie sollen wir dagegen dieses konstant bleibende Element bezeichnen, wenn wir die Verknüpfung mit den empirischen Begriffen Weiß und Grau, Fleck und Schatten, selbst Empfindung nennen und demgemäß bei jenem Umschlage von einer Änderung der Empfindung reden? Es wird uns bei dieser Bezeichnungsweise für ein unzweifelhaft doch bedeutungsvolles Verhalten die Benennung fehlen und wir werden sogar in Gefahr kommen, sie überhaupt aus den Augen verlieren und gänzlich verschiedenes zu verwechseln.[2]

Unbedingt also muß anerkannt werden, daß wir die Empfindung (im engeren Sinne des Wortes) von ihrer Verknüpfung mit empirischen Begriffen unterscheiden müssen, daß die erstere in relativ einfacher und wenig veränderlicher Weise von Reiz und Zustand der Sinnesorgane abhängt, die letztere dagegen ganz andersartigen und (wenn auch in letzter Instanz sicher auch physiologisch aufzufassenden) doch weit verwickelteren Gesetzen untersteht.

Die Berechtigung dieser Betrachtung wird, wenn ich recht verstehe, von HERING in Zweifel gezogen, der sagt, daß wir in Fällen wie den eben berührten, eben nur eine Änderung des Empfindungskomplexes konstatieren können von einer „reinen Empfindung" aber nichts wissen. Demgegenüber muß aber betont

[1] S. z. B. HERMANNS Handbuch der Physiologie. III. S. 568. Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn in GRÄFE-SÄMISCHS Handbuch der Augenheilkunde. Kap. XII. S. 8f.

[2] So liegt z. B. der Irrtum nahe, als ob HERING auch bei den Kontrasterscheinungen Beeinflussungen der Empfindung in dem hier in Rede stehenden Sinne angenommen hätte, während er doch solche von ganz anderer Natur behauptete, und im Gegenteil die Annahme einer Modifikation von der Art, wie sie bei dem Umschlag des Eindruckes von Fleck und Schatten stattfindet, sich mit der HELMHOLTZschen Deutung decken und nur durch die Benennung von ihr unterscheiden würde.

werden, daß der hier unmittelbar und zwingend gegebene Eindruck des Konstantbleibens der eigentlichen Empfindung eine Erfahrung über diese darstellt, und daß sie daher keineswegs unserer Beobachtung gänzlich entzogen ist. Ferner muß daran erinnert werden, daß gerade nach der von HERING selbst vertretenen Theorie der Gesichtsempfindungen bei einem Umschlage der erwähnten Art ein Wechsel im Verhältnis der D- und A-Prozesse nicht anzunehmen ist, somit auch die physiologische Grundlage jenes konstant bleibenden Bewußtseinselementes ohne weiteres angegeben werden kann. Es muß also aufs entschiedenste daran festgehalten werden, daß die Frage nach der Gestaltung der Empfindung selbst von der nach ihrer Verknüpfung mit empirischen, gedächtnismäßig festgehaltenen Begriffen getrennt werden muß, und daß diese Unterscheidung nicht nur ein theoretisches Postulat darstellt, sondern in gewissem Umfange auch in unseren Beobachtungen eine ganz einwandsfreie Anwendung finden kann.

Ein Gebiet, für das die eben dargelegten Verhältnisse gleichfalls maßgebend in Betracht kommen, bilden die Größenvergleichungen, und es wird daher hier der Ort sein, auch auf dieses unter den hier gewonnenen Gesichtspunkten noch einmal zurückzukommen. Auch die die absolute Größe betreffenden Eindrücke gehören offenbar zu den Urteilen, die in der uns hier beschäftigenden Weise unmittelbar an physiologische Vorgänge geknüpft sind; auch sie unterstehn den eigenartigen für diese Vorgänge bestehenden Bedingungen. Daß sich dies so verhält, zeigt sich schon darin, daß die gesehenen Gegenstände im allgemeinen (unter völligem Zurücktreten der Winkelgröße, oft auch der Entfernung) ganz direkt den Eindruck einer bestimmten absoluten Größe erzeugen. Diese ist es, die uns unmittelbar zum Bewußtsein kommt, die wir im Gedächtnis behalten, während wir die Winkelgröße weder anzugeben noch zu behalten imstande sind.[1] Im Hinblick hierauf ist es verständlich, daß (wie auch hier als bedeutungsvoll hervorgehoben werden muß) unsere unmittelbaren Eindrücke von den absoluten Größenverhältnissen gesehener Gegenstände nicht selten untereinander in Beziehungen stehen, die mathematisch unmöglich sind. Vor allem gilt dies für die Beziehungen der Winkelgröße, der Entfernung und des absoluten Größeneindruckes. Schon oben wurde im Hinblick auf diese Verhältnisse als wichtig hervorgehoben, daß (z. B. bei Akkommodationsanstrengung) bei unveränderter Winkelgröße die Objekte sich zu verkleinern, dabei aber keineswegs näher zu rücken scheinen, im Gegenteil auch die gesehene Entfernung zunimmt. Es gelingt also nicht, den absoluten Größeneindruck aus der Winkelgröße und dem Entfernungseindruck im Anschluß an die objektiv gültige mathematische Beziehung abzuleiten. Auch die Gesetze der Mathematik, so könnte man etwa im Anschluß an die vorhin erwähnte Formulierung FLEISCHLS sagen, gelten wohl für gedachte oder vorgestellte, nicht aber für unmittelbar empfundene Größen.

Auch bei dem viel umstrittenen Problem über die scheinbare Größe der Himmelskörper sind, wie ich glaube, diese Verhältnisse bisher nicht genügend gewürdigt worden. Mir erscheint als vorzugsweise merkwürdig und als der notwendige Ausgangspunkt aller speziellen Erklärungsversuche die Tatsache, daß die Himmelskörper, ich weiß nicht ob von allen, aber jedenfalls von sehr

[1] Vgl. hierüber die Bemerkungen in meinen Beiträgen zur Lehre vom Augenmaß. HELMHOLTZ-Festschrift. 1891.

vielen Personen, direkt in einer ganz bestimmten absoluten Größe wahrgenommen werden und zwar in einer solchen, die zu ihrer Winkelgröße und zu der Entfernung, in der sie gesehen werden, in einem auffälligen Mißverhältnis steht. Mir z. B. (und viele Personen haben mir ähnliches bestätigt), gibt die Scheibe des Vollmondes in durchaus zwingender Weise einen Eindruck, den ich, so sehr ich mir der Unsinnigkeit einer solchen Schätzung bewußt bin, sehr wohl als absolute Größe angeben kann. Ich kann sie auf etwa 20 cm Durchmesser taxieren, wenn der Mond hoch am Himmel steht, während sie bis auf 30—35 cm wächst, wenn er über dem Horizont aufgeht. Um bei dieser absoluten Größe unter dem Winkel zu erscheinen, in dem wir den Mond tatsächlich sehen, müßte ein Gegenstand in der Entfernung von 25 m sich befinden. Dem entspricht aber der wirkliche Entfernungseindruck in keiner Weise. Steht der Mond so, daß die Gleichheit seiner Winkelgröße mit der irgendeines irdischen Objekts unmittelbar anschaulich ist (z. B., wenn er mit seiner oberen Hälfte gerade einen Kamin überragt), so kommt jener Größeneindruck wohl ins Wanken. Sobald es aber an einem so unmittelbaren Vergleiche fehlt, ist er zwingend gegeben. Diese absoluten Größeneindrücke sind es nun doch wohl, die auch den Gegenstand der viel umstrittenen Täuschung bilden. Und es wird wie mir scheint nicht möglich sein, zu einer sicheren Erklärung dieser zu gelangen, ehe wir darüber ins Klare gekommen sind, wie es eigentlich zugeht, daß ein absoluter Größeneindruck, und zwar in solcher Diskrepanz mit dem Entfernungseindruck zustande kommt.

Durch die Anschauungen, zu denen wir hier gelangt sind, fixiert sich auch unser Standpunkt gegenüber den Theorien der geometrisch-optischen Täuschungen, insbesondere gewissen in dieser Hinsicht von WITASEK (Zeitschr. f. Physiologie usw. XIX. S. 81. 1899 aufgeworfenen allgemeinen Fragen, auf die ich daher hier auch noch kurz zurückkomme. WITASEK geht von der Frage aus, ob jene Täuschungen als Modifikationen der Empfindung oder als Urteilstäuschungen zu erklären seien und stellt in diesem Sinne Empfindungs- und Urteilshypothese einander gegenüber. Zum Verständnis dieser Formulierung muß bemerkt werden, daß unter Empfindungen hier die räumlichen Bestimmungen des Gesehenen, also wie wir auch sagen dürfen, die Lokalisationen gemeint sind.

Auch von dem hier eingenommenen Standpunkte aus können gewisse, den WITASEKschen ähnliche Betrachtungen angestellt werden. In der Tat wäre es ja denkbar, daß für jede Art optischer Eindrücke sich bestimmte (von den objektiven Formen der gesehenen Gegenstände mehr oder weniger abweichende) räumliche Gebilde angeben ließen, für welche alle unsere Urteile über die gegenseitigen Beziehungen der Teile (Größenverhältnisse, Richtungen, Krümmungen usw.) zutreffend wären, mit anderen Worten, daß unsere gesamten Urteile auf ein bestimmtes, allerdings von dem realen abweichendes Gebilde, in sich widerspruchslos paßten. Wäre dies der Fall, so könnten wir nun die Erklärung aller hierhergehörigen Erscheinungen ausschließlich in den Verhältnissen der Lokalisation suchen; für die Entstehung aller die inneren Beziehungen eines räumlichen Gebildes betreffenden Urteile bestünde aber insofern kein besonderes Problem, als sie eben durchweg richtig, d. h. den Beziehungen eines solchen bestimmten räumlichen Gebildes entsprechend wären.

Man kann nun meines Erachtens als wichtigste und auch als gesicherteste Tatsache auf diesem Gebiete die hervorheben, daß die Dinge so jedenfalls nicht liegen. Schon der eben angezogene Fall der Beziehungen zwischen absolutem Größen- und Entfernungseindruck lehrt, daß die Vergleichungsurteile selbst unter verwickelten Bedingungen stehen, denen zufolge sie unter Umständen mathematisch unmöglich und widersprechend sein können. Auch für die nur in zwei Richtungen ausgedehnten

Gebilde, auf die sich die sogen. geometrisch-optischen Täuschungen beziehen, kann an dem entsprechenden Verhalten wohl kaum gezweifelt werden.

Hieraus ergibt sich (in der Bezeichnungsweise WITASEKs), daß die Erscheinungen jedenfalls nicht allein im Sinne der „Empfindungshypothese" gedeutet werden können, vielmehr auch die der „Urteilshypothese" eigentümlichen Annahmen in gewissem Umfange zutreffend sind. Ist nun aber dies der Fall, so wird es (ganz ähnlich wie für die Kontrasterscheinung im Gebiete des Licht- und Farbensinnes) überaus schwierig sein, für eine Änderung der „Empfindung" im Sinne WITASEKs, d. h. der Lokalisation einen ganz entscheidenden Beweis zu erbringen. In der Tat ist der von WITASEK für eine Änderung der Lokalisation beigebrachte Beweis denselben Einwürfen ausgesetzt, wie häufige im Gebiete jener anderen Kontrasterscheinungen vorgebrachten Argumentationen. Auch hier wird von der meines Erachtens durchaus nicht einwandfreien Voraussetzung ausgegangen, daß die Bedingungen der Urteile in den psychisch aufweisbaren Bestimmungen erschöpfend gegeben sein müßten.[1]

Zieht man die komplizierten Bedingungen solcher direkt physiologisch bestimmter Urteile in Betracht, so erscheint der Beweis für die Änderung der Lokalisation nicht zwingend. Hiermit soll natürlich eine Beeinflussung der Lokalisationen in dem von WITASEK angenommenen Sinne nicht in Abrede gestellt werden. Nur wird es eben sehr schwierig sein, sie einwandsfrei zu beweisen, und noch schwieriger abzuwägen, welchen Anteil jene anderen Verhältnisse an den optischen Größentäuschungen haben.

Noch für eine weitere Gruppe von Fragen sind die hier entwickelten allgemeinen Anschauungen von Bedeutung. Wenn der Richtungseindruck, den uns ein sei es foveal, sei es exzentrisch gelegenes Netzhautbild hervorruft, abgesehen von dem Netzhautort auch noch durch die jeweilige Stellung der Augen bestimmt wird, so erhebt sich in bekannter Weise die Frage, in welcher Weise diese zur Geltung kommt, worin das wirksame den Richtungseindruck beeinflussende Moment zu suchen ist. Die bei Augenmuskellähmungen zu beobachtenden Scheinbewegungen lehren, daß es sich dabei um irgendwelche von den Muskeln ausgehende, durch ihre Kontraktions- oder Spannungszustände bedingte Empfindungen nicht handeln kann. Gelangt man hiernach dazu, die Tatsache der Innervation selbst als das maßgebende zu betrachten und die Grundlage des Stellungsfaktors in einem „Innervationsgefühl" zu suchen, so erhebt sich die Schwierigkeit, daß die Existenz eines solchen zum mindesten sehr zweifelhaft ist; wir können es uns jedenfalls nicht mit befriedigender Deutlichkeit zum Bewußtsein bringen. Ähnliches gilt für die Beeinflussung des Entfernungseindruckes durch Konvergenz und Akkommodation. Auch hier müssen wir nun meines Erachtens im Auge behalten, daß wir nicht berechtigt sind, dasjenige Moment, welches sich in der Beeinflussung der räumlichen Bestimmungen (Richtungs- wie Entfernungseindrücke) bemerkbar macht, als ein bestimmtes in unserem Bewußtsein aufweisbares, psychisches Element zu fordern, und daß wir demgemäß auch nicht genötigt sind, nach einem solchen zu suchen. Als das maßgebende werden wir, wie mir scheint, immer den physiologischen Vorgang der betreffenden Innervation selbst ansehen müssen, der zufolge irgendeines Zusammenhanges in die den Ortseindruck bestimmenden Vorgänge eingreift.

---

[1] S. z. B. die Betrachtungen a. a. O. S. 155, wo das Eingehen dieser Voraussetzung besonders deutlich zutage tritt.

Sieht man die Dinge in dieser Weise an, so erscheint es für die uns beschäftigenden Fragen ohne großen Belang, ob jene Innervationen von einem bestimmten psychisch aufweisbaren Gefühl begleitet sind oder nicht; jedenfalls erwächst ihnen aus der Bestreitung eines solchen keine Schwierigkeit.

In ähnlicher Weise werden wir uns auch eine direkte Beeinflussung der absoluten Größeneindrücke durch Akkommodations- (oder Konvergenz-) Verhältnisse denken können; und es wird auf dieser Grundlage dann auch verständlich werden, daß, wie wir früher sahen, diese Zusammenhänge nicht immer durch eine entsprechende Gestaltung des Entfernungseindruckes vermittelt zu sein brauchen. (Vgl. oben S. 322.)

Die hier besprochenen Verhältnisse sind nun auch für die Probleme der Lokalisation nicht ohne Bedeutung. Sie lehren, daß auch verwickelte psychologische Gebilde, über deren empirische Entstehung kein Zweifel bestehen kann, gleichwohl hinsichtlich ihres Eintretens unter Gesetzen stehen können, wie man sie früher nur den Empfindungen zuzutrauen geneigt war, so nämlich, daß die Bedingungen ihres Entstehens sich als Bewußtseinserscheinungen gar nicht oder nur unzureichend aufweisen lassen, somit wesentlich in physiologischer Form vorgestellt werden müssen. Man sieht hieraus, daß das, was eine empiristische Theorie von den räumlichen Bestimmungen annimmt, keineswegs etwas exzeptionelles ist, sondern ganz ähnliches in großem Umfange stattfindet. Und es zeigt sich hierdurch zugleich, daß die „Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit", die man wohl als Kriterium eines direkten Empfindens in Anspruch zu nehmen geneigt ist, tatsächlich in großem Umfange entwickelt werden kann, also über die ursprüngliche Natur und die Entstehungsart uns keinerlei Auskunft gibt. Daß ein besonderes Verhältnis der beidäugigen Eindrücke uns in so prompter und zwingender Weise, wie wir dies kennen, den Eindruck einer bestimmten Entfernungsanordnung hervorruft, daß der Ortswert, den wir bei unseren Sehempfindungen als etwas unmittelbar gegebenes erhalten, eine bestimmte Beziehung zu unserem Körper bedeutet, dessen ohne Zweifel empirische Vorstellung somit stets implizite in jene Bestimmungen eingeht: all dies wird uns nicht befremden, wenn wir im Auge behalten, daß in einer ganz ähnlichen Weise der Eindruck einer Bewegung, einer bestimmten absoluten Größe, überhaupt eines mannigfaltigen, durch empirische Begriffe bezeichneten Verhaltens erzeugt werden kann, nicht minder direkt und zwingend, zuweilen im Widerspruch mit unserem auf höheren intellektuellen Verhältnissen beruhenden Wissen.

Der allgemeinere Zusammenhang, in den hierdurch die Ausbildung der Lokalisation gerückt erscheint, ist der eine der hier zu beachtenden Punkte. Ein zweiter nicht minder wichtiger besteht darin, daß wir auch hier auf die Natur des Erlernens als einer physiologischen Ausbildung hingewiesen werden. Hierdurch, wie wir später noch sehen werden, eröffnet sich der Ausblick auf einen weiteren Kreis von Möglichkeiten, als sie bei einer streng an die psychischen Erscheinungen geknüpften und nur diese berücksichtigenden Betrachtung in Frage kommen würden. Müssen wir auch zugeben, daß uns die Modalitäten derartiger Ausbildung im einzelnen vorläufig nicht bekannt sind, so können wir doch behaupten, daß sie in dem was wir jetzt die Plastizität der zerebralen Einrichtungen zu nennen pflegen, eine gewisse Unterlage finden, einer Eigenschaft, die ja die neueren Erfahrungen (es sei nur an das Umlernen

bei verkehrter Verheilung motorischer Nerven erinnert immer höher zu veranschlagen gelehrt haben.

Wenn wir nach diesen Darlegungen noch einmal zu der Benennungsfrage zurückkehren, von der wir ausgegangen waren, so ergibt sich meines Erachtens mit Deutlichkeit, daß die Zurechnung der räumlichen Bestimmungen zur Empfindung mindestens sehr unratsam ist. Sie sind von dem, was wir im engeren Sinne Empfindungen nennen und als ein wohl charakterisiertes Gebiet leidlich scharf abgrenzen können, sowohl durch ihre unmittelbar gegebene psychologische Beschaffenheit wie durch die Bedingungen, von denen sie abhängen, so tiefgreifend verschieden, daß ihre Bezeichnung mit demselben Namen sich in keiner Weise empfiehlt. Darf auf der anderen Seite zugegeben werden, daß sie, wiewohl in gewissem Sinne als Urteile zu bezeichnen, von dem, was wir in der Hauptsache so nennen, doch auch verschieden sind, so wird man es nur völlig zweckentsprechend und sachgemäß finden können, daß Helmholtz mit dem Ausdruck der **Wahrnehmungen** für dieses ganze Gebiet eine besondere Bezeichnung eingeführt und festgelegt hat.

Aus diesem Grunde habe ich mich auch nicht entschließen können mit Exner, so sehr ich seine hierhergehörigen Beobachtungen als richtig und bedeutungsvoll anerkenne, von dem Empfinden einer Bewegung zu sprechen. Der Eindruck, daß ein Körper sich bewege oder bewegt habe, ist seinem psychischen Inhalte nach sicherlich als ein Urteil zu bezeichnen; das ist hier noch mehr als bezüglich der einfachen Lokalisation unmittelbar einleuchtend. Steht er dieser hinsichtlich der Zwangsmäßigkeit und Unmittelbarkeit seines Eintretens gleich, so werden wir konsequenterweise auch für ihn den Namen der Wahrnehmung in Anwendung bringen müssen. Allerdings dürfen wir uns durch diese Benennung darüber nicht täuschen lassen, daß auch mit ihr gewiß nicht lauter vollkommen einheitliches, sondern mancherlei untereinander noch erheblich verschiedenes bezeichnet wird. Ob es möglich sein wird, diesen Übelstand durch eine Ergänzung oder weitere Spezialisierung der Bezeichnungen zu beseitigen, ist fraglich; jedenfalls läßt sich dies wohl kaum in einer ganz allgemeinen Weise ausführen, sondern es werden dabei die besonderen Verhältnisse jedes einzelnen Gebietes zu berücksichtigen sein. Für die Wahrnehmung der Bewegungen scheint mir zunächst die Unterscheidung zweier Modalitäten als direkte und indirekte Bewegungswahrnehmung genügend. Weit verwickelter dürften die Dinge für die Wahrnehmung der Entfernung liegen. Mit der großen Verschiedenheit derjenigen Momente, die überhaupt den Entfernungseindruck bestimmen, sind ohne Zweifel auch gewisse Unterschiede in der Art dieses Eindruckes selbst verknüpft. Diejenigen, die uns ein Gemälde gibt, sind verschieden von denjenigen, die wir im Stereoskop erhalten, aber auch von denjenigen, die z. B. in der Natur bez. der entfernteren Teile der Landschaft stattfinden, obwohl diese auf denselben Momenten (Perspektive, scheinbare Größe, Luftperspektive usw.) beruhen, wie sie auch beim Gemälde gegeben sind. Es kann hier auch zweifelhaft erscheinen, wie weit wir den Namen der Wahrnehmung erstrecken sollen; und es ist in neuerer Zeit mehrfach eine Unterscheidung gefordert worden in dem Sinne, daß der wahrgenommenen (oder empfundenen) eine nur vorgestellte Entfernung gegenüberzustellen sei. Mir scheint jedoch, daß eine derartige Sonderung auf große Schwierigkeiten stoßen wird. Die auf den sogen. empirischen Momenten be-

ruhenden Entfernungseindrücke als vorgestellte den binokular bestimmten als wahrgenommenen gegenüberzustellen, wird schon durch die mannigfaltige Art, wie beides ineinandergreift, sich verbieten. Hängt doch die Entfernung, in der uns ein mit irgendeiner Querdisparation gesehener Punkt erscheint, in verwickelter Weise von dem Betrage dieser Querdisparation und von den gesamten die scheinbare Entfernung des Fixationspunktes selbst bestimmenden empirischen Momenten ab. Mir ist es aus diesem Grunde richtiger erschienen, wo die Bezeichnung als Wahrnehmung auf Bedenken stoßen kann, die ganz allgemeine Benennung des Entfernungseindruckes zu benutzen.

Wenn in diesem Punkte die von HELMHOLTZ eingeführte Bezeichnungsweise als eine ebenso zutreffende wie glückliche erscheint, so kann sie vielleicht eher insofern auf Bedenken stoßen, als auf eine Reihe von Vorgängen und Einrichtungen, die wir als physiologische aufzufassen veranlaßt sind, Ausdrücke von ursprünglich psychologischer Bedeutung angewendet werden. Hierher gehört namentlich der viel umstrittene Begriff der unbewußten Schlüsse. Wir werden auf das was HELMHOLTZ hiermit meinte und auf die Berechtigung dieser Benennung später noch kurz zurückkommen.

6. Empirismus und Nativismus.

Wenn ich im folgenden den Versuch mache, aus dem bisher Besprochenen ein einheitliches Ergebnis zu entnehmen, so ist, wie ich vorausschicken möchte, meine Absicht nicht die, eine bestimmte Anschauung von den Verhältnissen der räumlichen Wahrnehmung zu entwickeln und deren Annahme als der richtigen oder zurzeit wahrscheinlichsten zu empfehlen. Vielmehr soll (wie dies der hier gestellten Aufgabe, übrigens auch meinen wissenschaftlichen Neigungen und Grundsätzen entspricht) lediglich versucht werden, darzulegen, was innerhalb des uns beschäftigenden Gebietes mit einiger Sicherheit behauptet werden kann und was beim derzeitigen Stande unseres Wesens sich einer sicheren Beurteilung entzieht.

Der mit den Schlagworten des Empirismus und des Nativismus bezeichnete Gegensatz hat hier seit lange im Mittelpunkte des Interesses gestanden und er ist in der Tat auch geeignet, die in Betracht kommenden Fragen zu bezeichnen. Es empfiehlt sich jedoch zur Klarstellung dessen, worauf es uns eigentlich ankommen muß, eine Bemerkung vorauszuschicken, die in der Hauptsache dem Begriffe des Nativismus zu gelten hat. Fassen wir diesen dem Wortlaut entsprechend so auf, daß er das Angeborensein irgendwelcher Einrichtungen, Funktionsweisen usw., also ihr Vorhandensein im Zeitpunkt der Geburt behauptet, so empfindet man sogleich, daß in dieser Bestimmung durch die Wahl gerade dieses Zeitpunktes etwas einigermaßen Willkürliches liegt. Auch ist ja nicht zu bestreiten, daß wir uns eine Entstehung oder Bildung irgendwelcher Einrichtungen etwa im Laufe des ersten Lebensjahres denken können, die trotzdem nicht auf ein Erlernen oder Einüben zurückzuführen, sondern im nativistischen Sinne aufzufassen wäre. Das, worauf es ankommt, ist also nicht der Zeitpunkt, sondern die Art und Weise solcher Entstehungen oder Entwickelungen. Der hier gemachte Gegensatz beruht demgemäß auch auf einer ganz bestimmten allgemeinen Anschauung; er geht davon aus, daß in der Entstehung und Ausbildung unseres Organismus zwei Modalitäten zu unterscheiden sind. Durch die eine (unserem speziellen Einblick vorläufig so ziemlich verschlossene) haben wir uns die Gestaltung des Organismus insoweit festgelegt

zu denken, wie dies seiner Zugehörigkeit zu einer bestimmten Art und speziellen Vererbungsverhältnissen entspricht. Wir dürfen die Gesetze, unter denen die Gesamtheit dieser Vorgänge steht, wohl als Bildungsgesetze bezeichnen. Aus all dem, was wir dem bildungsgesetzlich Bestimmten als ein Erworbenes gegenüberstellen, dürfen wir als für unsere Zwecke hier allein in Betracht kommend das herausheben, was sich in den uns in ihren Grundzügen bekannten Formen der Einübung und Erlernung vollzieht, Ausbildungen, die offenbar auf gewissen, dem Zentralnervensystem in ganz exzeptioneller Weise zukommenden Eigenschaften beruhen und durch sie ermöglicht sind. — Gehen wir von dieser allgemeinen Anschauung aus, so wird in bezug auf die Lokalisation ganz ebenso wie in bezug auf zahlreiche andere Gegenstände zu fragen sein, welche Rolle einerseits bildungsgesetzlich begründete Verhältnisse, andererseits Vorgänge des Erlernens bei ihrer Entstehung spielen.

Sind für eine solche Frage zwar Beantwortungen denkbar, die wir kurzweg nativistische und empiristische Auffassung nennen dürften, so stellt sich doch der mit diesen Worten bezeichnete Gegensatz als kein so einfacher dar, wie etwa der der Emissions- und Undulationstheorie des Lichtes; und es wäre sehr irrtümlich, Nativismus und Empirismus als zwei einander entgegenstehende Annahmen zu betrachten, von denen notwendig die eine richtig und die andere falsch sein müßte. Vielmehr muß berücksichtigt werden, daß ja sehr wohl gewisse angeborene durch Bildungsgesetze bestimmte Einrichtungen bestehen können, die gleichwohl durch Übung und Erlernung modifiziert und entwickelt werden, somit für den Vorgang des Erlernens Grundlage und Ausgangspunkt abgeben. In diesem Falle würden Verhaltungsweisen, die einer nativistischen und solche, die einer empiristischen Auffassung entsprechen, in irgendeiner Weise miteinander kombiniert sein. Die uns gestellte Aufgabe wäre demnach allgemein gesprochen die, die Bedeutung einerseits bildungsgesetzlich fixierter Grundlagen, andererseits der den allgemeinen Einübungsgesetzen folgenden Vorgänge darzulegen und in die Art, wie sie zusammenwirken und ineinandergreifen, einen Einblick zu gewinnen. Ferner ist sogleich darauf hinzuweisen, daß wir hier eine Anzahl verschiedener Punkte auseinanderhalten müssen, die jedenfalls insoweit verschieden sind, daß die für sie etwa in Frage kommenden bildungsgesetzlichen Grundlagen von ungleicher Natur und Bedeutung sein werden, und die daher eine unabhängige Prüfung in dieser Hinsicht gestatten und erfordern. Und zwar können wir, was die Lokalisationsverhältnisse anlangt, zweckmäßig dreierlei unterscheiden: die Richtungsanordnung der gesehenen Dinge innerhalb des Gesichtsfeldes, die als Synchyse und Korrespondenz bezeichneten Beziehungen der beiden Augen, endlich die Tiefen- oder Entfernungsbestimmungen. Als ein viertes kann diesen die Gesetzmäßigkeit der Augenbewegungen angereiht werden, ein allerdings schon wesentlich anderer Gegenstand, der aber doch in vielen Beziehungen verwandt und daher zweckmäßig in diesem Zusammenhange mit zu besprechen ist.

Bei der Vorsicht, mit der unsere Betrachtung zu führen ist, erscheint ein Modus procedendi wünschenswert, der, wie ich hoffe, dem Leser nicht als unnütze Weitschweifigkeit erscheinen wird: wir wollen nämlich zuerst nur in allgemeinster Weise fragen, ob in den fraglichen Hinsichten überhaupt bildungsgesetzliche Grundlagen anzunehmen sind, und erst in zweiter Stelle prüfen, ob und welche genaueren Vorstellungen wir uns etwa über deren Natur machen können.

Was zunächst die Richtungsanordnung der gesehenen Dinge innerhalb eines monokularen Gesichtsfeldes anlangt, so entspricht ja diese in bekannter Weise mit Annäherung derjenigen der Bilder auf der Netzhaut. Diesen beim normalen Sehen des Erwachsenen bestehenden Zusammenhang könnten wir ganz rein durch Einübung und ohne jede bildungsgesetzliche Unterstützung zustande gekommen nennen, wenn z. B. von Haus aus den Eindrücken jeder Netzhautstelle eine ihre Unterscheidung von anderen gestattende Eigentümlichkeit zukäme (ein Lokalzeichen im Sinne Lotzes), diese Lokalzeichen aber lediglich die Unterscheidung der einzelnen Eindrücke ermöglichten, nicht aber zugleich eine bestimmte der objektiven entsprechende Anordnung irgendwie begünstigten oder vorbereiteten. Dies würde der Fall sein, wenn die den einzelnen Stellen zukommenden Lokalzeichen ganz unregelmäßige und zusammenhangslose Beschaffenheiten darstellten, insbesondere keine, die sich in stetiger Weise mit den Netzhautorten ändern. Niemand, wie ich glaube, wird für wahrscheinlich erachten, daß die Dinge sich so verhalten sollten. Denn abgesehen davon, daß wir eine regellose Durcheinandermischung der den einzelnen Netzhautorten zugehörigen Reizerfolge, sei es nun hinsichtlich einer psychischen Eigentümlichkeit, sei es in irgendeiner anderen Beziehung, als völlig zweckwidrig im voraus für höchst unwahrscheinlich halten dürfen, wird man auch nicht bestreiten können, daß die erfahrungsmäßige Ordnung einer so enormen Zahl ganz zusammenhangsloser Zeichen über menschliche Erlernungsfähigkeit wohl weit hinausgehen würde. So wird denn über die Mitwirkung einer bildungsgesetzlichen Einrichtung hier kein ernster Zweifel bestehen können, einer Einrichtung, die in möglichst allgemeiner Form dahin zu charakterisieren wäre, daß die Reizungserfolge der verschiedenen Netzhautstellen auch in zentralen Teilen eine den Netzhautorten entsprechende stetige Veränderlichkeit darbieten, die der subjektiven räumlichen Anordnung irgendwie zur Grundlage dient und eine Anordnung der einzelnen Eindrücke in der den Netzhautorten entsprechenden Weise sei es nun mit Notwendigkeit ohne weiteres ergibt, oder doch gegenüber jeder abweichenden in hohem Grade begünstigt und erleichtert.

Die hiermit gewonnene Anschauung müssen wir sogleich in einer nicht unwichtigen Beziehung einschränken. Das allerdings werden wir uns bildungsgesetzlich festgelegt denken dürfen, daß die den verschiedenen Netzhautorten zugehörige Wahrnehmung in einer entsprechenden Weise angeordnet sind; was auf den unmittelbar benachbarten Punkten a_1 und a_2 abgebildet ist, wird also jedenfalls in Richtungen r_1 und r_2 gesehen werden, die wiederum nur sehr wenig verschieden sind. Und liegt ein Netzhautpunkt c innerhalb der geschlossenen Linie p, so wird es festgelegt sein, daß dieser eine geschlossene Richtungsgesamtheit (ein Kegelmantel) entspricht, welche die dem Punkte c zugehörige einschließt. Als bildungsgesetzlich festgelegt dürfen wir also die Anordnung der gesehenen Dinge wohl der Lage nach vermuten. Eine ganz andere Frage aber ist es, ob sie es auch ist mit Bezug auf die quantitativen Verhältnisse der zwischen den einzelnen Punkten bestehenden Richtungsunterschiede. Dies anzunehmen, haben wir keinerlei zwingenden Anlaß. Im Gegenteil: nach allem, was wir zurzeit wissen, ist es weit wahrscheinlicher, daß die genauere quantitative Fixierung dieser Verhältnisse eine Sache der Erfahrung sei.[1]

---

[1] Das, was wir uns als bildungsgesetzlich festgelegt denken können, würde also die Anordnung im Gesichtsfelde noch in einer ähnlichen Weise veränderlich lassen, wie ein auf eine Gummiplatte gemaltes Bild durch die örtlich verschiedenen Dehnungen des Gummis umgestaltet werden kann.

Es sind besonders die kleinen auf besondere Umstände des Sehens zurückzuführenden Abweichungen der räumlichen Bestimmungen von den anatomisch einfachen und regelmäßigen Verhältnissen, die eine solche empirische Festlegung wahrscheinlich machen. Die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane, die sogen. HERING-HILLEBRANDsche Horopterabweichung, aber auch eine Reihe weiterer Besonderheiten des Augenmaßes lassen sich in ansprechender Weise verständlich machen, wenn wir von der Annahme ausgehen, daß jene quantitativen Fixierungen sich auf Grund der Erfahrung entwickeln.[1] Daß die Sehverhältnisse in einer derartig detaillierten Weise zufolge phylogenetischer Entwickelung und Vererbung festgelegt sein sollten, erscheint wenig glaublich. Dazu kommt, daß wir an den binokular wahrgenommenen Tiefen in besonders überzeugender Weise sehen können, wie sehr die an bestimmte physiologische Verhältnisse geknüpfte räumliche Bestimmung in quantitativer Beziehung durch die mannigfachsten Umstände beeinflußt werden kann. Allerdings sind wir hiermit bei einer Frage angelangt, die eine sichere Beantwortung nicht mehr gestattet und es muß zugegeben werden, daß, wenn jemand alle die erwähnten Verhältnisse für bildungsgesetzlich festgelegt haben will, wir nicht in der Lage sind, dies mit Sicherheit zu bestreiten.

Wenn wir an zweiter Stelle hier die Beziehung der beiden Augen erwähnen, so müssen dabei zwei Dinge auseinandergehalten werden. Wir hatten oben als besonders wichtig zunächst die Tatsache hervorgehoben, daß zwischen den Eindrücken des rechten und linken Auges im allgemeinen kein Unterschied besteht, der sich in irgendeine Beziehung zu dem der objektiven Lage des rechten und linken Auges setzen ließe. Für diese Synchyse der rechts- und linksäugigen Eindrücke sind wir ohne Zweifel berechtigt, gleichfalls eine bildungsgesetzliche Grundlage anzunehmen. Vor allem dürfen wir hier sogleich an wohlbekannte anatomische Verhältnisse erinnern. Wir wissen, daß zufolge der partiellen Kreuzung im Chiasma die beiden rechten Netzhauthälften mit der einen, die beiden linken mit der anderen Hirnhälfte in Verbindung stehen. Schon hierdurch sind die zentralen Verknüpfungen des rechten und linken Auges in eigenartige, für kein anderes Organ ähnlich existierende Beziehungen gesetzt, Beziehungen jedenfalls von der Art, daß die uns sonst gewohnte strenge Scheidung des Rechts- und Linksseitigen hier nicht besteht.

Wir können ferner die folgende einfache Überlegung anstellen. Besäßen von Haus aus die Eindrücke der beiden Augen eine auffällige und greifbare Verschiedenheit, wären zugleich auch die beiden Augen von Haus aus unabhängig beweglich, würde insbesondere durch einseitige Belichtung eine Bewegung nur des gereizten, nicht des anderen Auges ausgelöst, so wäre es kaum verständlich, wie wir zu einer Lokalisation von der Art der tatsächlich verwirklichten kommen sollten. Es würde vielmehr zu erwarten sein, daß sich eine Lokalisation entwickelte, wie sie etwa dem Tasten mit beiden Händen eigentümlich ist, eine solche also, bei der rechts- und linksäugige Eindrücke differenziert verwertet würden, eine nicht synchytische. Betrachtet man die Tatsachen im Zusammenhange, so wird meines Erachtens kein Zweifel darüber bestehen können, daß die synchytische Natur unseres Sehens eine bildungsgesetzliche Grundlage mindestens insofern hat, als für die Augen alle Einrichtungen fehlen, die auf eine Unterscheidung des Rechts- und Linksäugigen

[1] Voraussetzung ist dabei, daß auch die Korrespondenzverhältnisse der beiden Augen mindestens für exzentrische Stellen nicht absolut genau festgelegt sind, sondern in gewissem Umfange eine erfahrungsmäßige Modifikation gestatten; auch dies wird durch die hier angeführten Tatsachen wahrscheinlich gemacht, worauf wir sogleich zurückzukommen haben.

und auf eine Verknüpfung mit den dem Tastsinn angehörigen Vorstellungen von den Orten des rechten und linken Auges hinzielten. Überall ist ohne Zweifel die räumliche Wahrnehmung durch eine bestimmte zentrale Repräsentation der peripheren Sinnesflächen, daneben wohl auch durch reflektorische Zusammenhänge in gewisser Weise vorbereitet. Daß demgemäß auch die eigentümlichen Unterschiede der Lokalisation, die zwischen Gesichts- und Tastsinn bestehen (die Synchyse der optischen Wahrnehmungen), auch in einem Unterschiede jener Vorbereitungen zum Ausdruck kommt oder (anders ausgedrückt) die Besonderheit der Funktionsweise eine bildungsgesetzlich vorbereitete ist, kann nach Maßgabe der bekannten anatomischen Tatsachen nicht bezweifelt werden.

Von der hier erwogenen Frage müssen wir, wie oben erwähnt, die andere trennen, ob auch in spezieller und detaillierter Weise die Korrespondenzbeziehungen der beiden Augen bildungsgesetzlich festgelegt sind. Man kann zugunsten dieser Annahme wohl auf die Zähigkeit hinweisen, mit der sich die primären Korrespondenzbeziehungen bei abnormen Augenstellungen erhalten, ihre Nachweisbarkeit in Fällen, in denen vermutlich niemals mit normaler Augenstellung gesehen worden ist, ferner auf die, wenn auch wohl nicht ganz einwandsfrei festgestellte doch sehr wahrscheinliche Unterwertigkeit der abgeänderten gegenüber der normalen Korrespondenz, endlich auf die verhältnismäßig schnelle Etablierung normaler Korrespondenz nach operativer Richtigstellung der Augen.[1] Man wird jedoch auf der anderen Seite auch bedenken müssen, daß (wie schon mehrfach erwähnt) die normale Korrespondenz schon dadurch eine besonders begünstigte ist, daß die Verknüpfung hier die beiden Stellen höchster Sehschärfe betrifft. Außerdem ist zu beachten, daß sehr wohl bildungsgesetzliche Grundlagen denkbar sind, die nicht ohne weiteres jeden Zapfen der einen mit einem bestimmten der anderen Netzhaut in Konnex setzen, sondern der Verknüpfung einen gewissen Spielraum lassen. Mögen wir also auch eine gewisse Vorbereitung der Korrespondenzbeziehungen annehmen (eine Annahme, der, wie ich bemerken darf, ich persönlich stets zugeneigt habe), so muß man doch sagen, daß es mindestens auf Schwierigkeiten stößt, anzugeben, wieweit sich ihre Bedeutung erstreckt, d. h. mit welchem Präzisionsgrade rechts- und linksäugige Netzhautpunkte in Konnex gesetzt sind.

Die Annahme eines solchen Spielraumes wird um so berechtigter erscheinen, wenn man davon ausgeht, daß ein solcher selbst beim ausgebildeten Sehen in gewissem Betrage besteht. Dies würde der Fall sein, wenn die Beziehung der Richtungsgleichheit durch die Beschaffenheit der gesehenen Gegenstände selbst in gewissem Umfange modifizierbar wäre. In der Tat ist wahrscheinlich, daß, wenn der rechte Netzhautpunkt a durchschnittlich mit a richtungsgleich ist, bei bestimmten Beschaffenheiten der Bilder der Eindruck von a auch mit dem des nahe benachbarten Punktes a' verschmelzen, d. h. richtungsgleich werden kann. Dabei werden denn auch durchschnittlich richtungsgleiche Punkte auseinanderfallende (richtungsungleiche) Eindrücke liefern müssen, so daß die ganze Beziehung der Richtungsgleichheit um ein weniges verschoben erscheint. Ob sich dies in der Tat so verhält, ist zwar eine besonders viel umstrittene Frage, kann aber meines Erachtens nach den in dieser Hinsicht durchaus überzeugenden Ausführungen, die Helmholtz in dieser Hinsicht gegeben hat, kaum bezweifelt werden. (S. 369.). Auch die vorhin schon erwähnten Detailverhältnisse, die Abweichung der scheinbar vertikalen Meridiane,

[1] S. o. S. 484.

sowie die Hering-Hillebrandsche Horopterabweichung lassen sich, wie dort angeführt, als Ergebnisse einer empirischen Ausbildung verständlich machen, wenn wir die Korrespondenz als eine von Haus aus nicht vollkommen fixierte betrachten.

Ganz anders stellen sich die Dinge in bezug auf den dritten hier zu erwähnenden Punkt, die Entfernungswahrnehmungen.

Diejenigen Umstände, die wir als empirische Momente zu bezeichnen pflegen, scheiden hier ohne weiteres aus und es kann also höchstens mit Bezug auf die binokulare Tiefenwahrnehmung an eine bildungsgesetzliche Grundlage gedacht werden. Auch in bezug auf diese wurde oben dargelegt, wie überaus verwickelt ihre Bedingungen sind und eine wie große Rolle dabei eine Reihe von Umständen sicher empirischer Natur spielen. Daraus ergibt sich sogleich, daß, wenn wir eine angeborene Grundlage der Entfernungswahrnehmung in einer relativ einfachen Form annehmen, wie sie nach Maßgabe analoger Verhältnisse etwa glaublich erscheinen könnte, wir dazu geführt werden, den Seheindrücken angeborene Entfernungsbestimmungen zuzuschreiben, die völlig täuschend und unrichtig wären, die tatsächlich nicht vorhanden, sondern rein fiktiv sind. Dies gilt z. B. von dem Versuche Herings, den Punkten der medialen Netzhauthälfte positive und denen der lateralen negative Tiefenwerte zuzuschreiben. Die Prüfung des einäugigen Sehens zeigt unzweideutig, daß solche Tiefenwerte nicht vorhanden sind. Nur ein ganz bestimmtes, von verwickelten Bedingungen abhängiges Zusammenwirken rechts- und linksäugiger Eindrücke erzeugt tatsächlich den Eindruck solcher Tiefenanordnungen.

Nun könnte man ja meinen, es sei bildungsgesetzlich festgelegt, daß eine bestimmte Kombination rechts- und linksäugiger Eindrücke, wenn sie stattfindet, in ganz bestimmter Weise einen Entfernungseindruck hervorrufe. Allein man wird doch zugeben müssen, daß ein derartiger Zusammenhang, bei dem der Erfolg (der Tiefeneindruck) von einer eigenartigen Kombination der Reizerfolge zweier Orte abhängt, überdies auch quantitativ wiederum noch durch eine Reihe ganz andersartiger und sicher empirischer Umstände bestimmt wird (denjenigen nämlich, die die scheinbare Entfernung des Fixationspunktes bestimmen), daß, sage ich, ein solcher Zusammenhang gänzlich außerhalb dessen liegt, was wir uns in verständlicher und durch die Analogie zu Bekanntem gestützter Weise als bildungsgesetzlich festgelegt denken können.

Die Annahme einer bestimmten bildungsgesetzlichen Grundlage für die Tiefenwahrnehmung scheitert also daran, daß wir schlechterdings nicht anzugeben imstande sind, von welcher Art eine solche etwa sein, was sie bestimmen oder auch nur vorbereiten könnte, ohne uns entweder durch die Annahme rein fiktiver nirgends aufweisbarer Tiefenwerte mit den beobachtbaren Tatsachen in direkten Widerspruch zu setzen oder über das, was bildungsgesetzlich bestimmt sein sollte, Annahmen zu machen, die nirgends anderweit eine Grundlage oder Analogie finden.

Wenn hiernach die Existenz einer speziellen bildungsgesetzlichen Grundlage für die Entfernungslokalisation überaus unwahrscheinlich ist, so dürfen wir aber auch weiter hervorheben, daß, indem wir uns diese Seite der Wahrnehmung in ganz empiristischer Weise denken, wir dem Erlernen nichts zutrauen, was über das Glaubliche und Denkbare hinausginge. Für die im engeren Sinne sogen. empirischen Momente darf dies wohl, in Anbetracht der ihnen tatsächlich zukommenden Bedeutung, als selbstverständlich gelten. Aber es gilt insbesondere auch für die Verhältnisse der binokularen Entfernungswahrnehmung. Denn wir

müssen bedenken, daß für sie schon in denselben Einrichtungen, die wir mit Rücksicht auf die Richtungslokalisation und den Zusammenhang der beiden Augen anzunehmen veranlaßt waren, eine gewisse Grundlage gegeben sein würde. Erlernt müßte nur werden, gewisse in diesen Hinsichten stattfindende Beziehungen mit den Entfernungsvorstellungen in Verbindung zu bringen, also eine Modalität, ein Prinzip ihrer Verwertung; und dies ist eine Aufgabe, deren tatsächliche Lösung uns kaum überraschen kann, wenn wir bedenken, mit welcher Sicherheit auch andere sicher empirische Momente schließlich unsere Entfernungseindrücke bestimmen.

Mir scheint nach alledem, daß eine unbefangene Erwägung der Tatsachen mit Bezug auf die Frage, wie wir sie hier zunächst gestellt hatten, wenn auch natürlich nicht mit absoluter Gewißheit, doch mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Ergebnis gelangen läßt. Wir dürfen eine bildungsgesetzliche Grundlage vermuten für die den Netzhautorten entsprechende Nebeneinanderordnung der Seheindrücke innerhalb des Gesichtsfeldes, nicht minder wohl auch für die bestimmte Zusammenordnung rechts- und linksäugiger Eindrücke, die wir als Synchyse und Korrespondenz bezeichnen, während wir eine ähnliche Grundlage für die Wahrnehmung der Entfernung für durchaus unwahrscheinlich erklären müssen.

Weit größeren Schwierigkeiten begegnet naturgemäß der Versuch, uns von den bildungsgesetzlichen Einrichtungen, die durch die obige Betrachtung wahrscheinlich gemacht wurden, und, was damit ja genau zusammenhängt, von der Art eines an sie anknüpfenden Erlernungsvorganges eine genauere Vorstellung zu bilden. Der Versuch, dies zu tun, schließt insbesondere auch den ein, uns von der psychischen Natur eines noch nicht ausgebildeten Sehens, wie wir es etwa beim Neugeborenen vermuten können, ein Bild zu machen; und es versteht sich, daß wir mit der Bildung irgendwelcher Annahmen über diese unserer direkten Beobachtung absolut verschlossenen Verhältnisse unter allen Umständen ein überaus unsicheres Gebiet betreten.

Fassen wir zunächst eine Theorie ins Auge, die wegen ihrer schematisch-konstruktiven Natur und der damit zusammenhängenden Einfachheit vorangestellt zu werden verdient, die LOTZEsche Theorie der Lokalzeichen. Denken wir uns also als Ausgangspunkt für die räumliche Ordnung des Wahrgenommenen irgendwelche, zunächst nicht räumliche Merkmale, die den Empfindungen zukommen und bezüglich deren sich die von verschiedenen Netzhautstellen ausgelösten Empfindungen unterscheiden. Das jeder Netzhautstelle zukommende Lokalzeichen hätten wir uns bildungsgesetzlich bestimmt zu denken, und es wäre dabei gemäß den obigen Erörterungen anzunehmen, daß die Lokalzeichen eine Beschaffenheit darstellen, die sich in stetiger Weise mit den Netzhautorten ändert, sowie auch, daß zwischen den Lokalzeichen korrespondierender Punkte irgendeine auszeichnende Beziehung besteht. Man wird anerkennen müssen, daß eine Erlernung des räumlichen Wahrnehmens auf dieser Grundlage einigermaßen denkbar erscheint. In der Tat: denken wir uns einerseits alle Gesichtsempfindungen mit stetig abgestuften Lokalzeichen behaftet, andererseits (was allerdings vorausgesetzt werden muß) die Raumvorstellung als solche gegeben, so könnte man sich denken, daß wir allmählich dazu gelangen, die mit einem bestimmten Lokalzeichen behaftete Empfindung auf einen an einer bestimmten Stelle des Raumes befindlichen Gegenstand zu beziehen, und wir könnten diesen

Vorgang den uns bekannten Erlernungen gleichstellen. Allein man muß doch andererseits zugeben, daß diese Auffassung zunächst insofern in der Luft schwebt, als sie mit Dingen rechnet, die wir nicht aufzuweisen imstande sind. Die hier mit dem Namen der Lokalzeichen benannten Merkmale sind uns jedenfalls als Bewußtseinserscheinungen nicht bekannt. Ein oben und ein unten gesehenes Objekt unterscheiden sich für uns eben dadurch, daß wir das eine oben, das andere unten sehen; einen anderen Unterschied, an den wir uns diese Differenz der räumlichen Erscheinung assoziativ geknüpft, den wir uns ihr zugrunde liegend denken könnten, vermögen wir uns jedenfalls nicht zum Bewußtsein zu bringen. Das Lokalzeichen ist als psychische Qualität etwas nicht Aufweisbares, etwas schlechthin Fiktives. Auch darf man wohl mit Recht behaupten, daß, wo tatsächlich in der hier angenommenen Weise assoziative Verknüpfungen stattfinden, so sehr auch die Endglieder der Assoziation für unser Interesse überwiegen mögen, es uns doch meist bei einiger Übung und Aufmerksamkeit gelingt, uns auch die Anfangsglieder zum Bewußtsein zu bringen.

Erscheint hiernach die Annahme der Lokalzeichen als psychische Qualität in hohem Grade bedenklich, so kann man die Frage aufwerfen, ob nicht ein Erlernen auch in der Form möglich ist, daß gewisse, im Bewußtsein nicht repräsentierte physiologische Vorgänge sich mit psychischen Phänomenen bzw. mit anderen (ein Bewußtseinskorrelat besitzenden) physiologischen Vorgängen den allgemeinen Assoziationsgesetzen gemäß verknüpfen. Unter dieser Voraussetzung würde die Tatsache, daß ein bestimmter physiologischer Vorgang wiederholt mit dem Wissen von einem an bestimmter Stelle befindlichen Gegenstande zusammentrifft, genügen, um es dahin zu bringen, daß jener physiologische Vorgang unmittelbar den Eindruck eines dort vorhandenen Objektes hervorruft. Daß ein Erlernen oder eine Ausbildung in dieser Form stattfinden kann, halte ich in der Tat für sehr wahrscheinlich.[1] Gehen wir hiervon aus, so hätten wir die Lokalzeichen nicht mehr als im Bewußtsein aufweisbare Merkmale in Anspruch zu nehmen; es brauchte ihnen lediglich die Bedeutung eines materiellen Unterschiedes zwischen den Reizerfolgen verschiedener Netzhautstellen zuzukommen, eines Unterschiedes, den man sich ja in erster Linie als einen anatomischen zu denken geneigt sein könnte.

Wie ich glaube, führt eine solche physiologische Auffassung der Erlernungsvorgänge, indem sie uns gestattet in entsprechender Weise die Lokalzeichen als physiologische, nicht als psychische Merkmale zu nehmen, zu einer, allerdings ja tiefgreifenden Veränderung der Theorie, durch die aber ein Teil der ihr entgegenstehenden Bedenken in der Tat beseitigt wird. Freilich zunächst nur ein Teil. Denn auch in dieser Form stößt die Theorie der Lokalzeichen noch auf andere und zum Teil wenigstens sehr bedeutungsvolle Schwierigkeiten. Das minder Wichtige ist wohl dasjenige, das am nächsten liegt und am häufigsten betont worden ist, daß wir nicht imstande sind, uns eine Gesichtsempfindung anders als in räumlicher Bestimmung zu denken. Jenes psychische Verhalten, das wir als Ausgangspunkt des Erlernens voraussetzen, ein von den räumlichen

[1] Ich glaube, daß insbesondere die beim Erlernen von Bewegungen zu beobachtenden Erscheinungen uns dazu führen, dem Zentralnervensystem allgemeine, auch einen derartigen Ausbildungsmodus in sich schließende Eigenschaften zuzuschreiben. Doch muß auf eine eingehende Darstellung dieser Verhältnisse an der gegenwärtigen Stelle verzichtet werden.

Bestimmungen abgelöstes optisches Empfinden: es ist gleichfalls etwas nicht Aufweisbares. Zutreffend ist dies ja wohl; wieviel darauf zu geben ist, kann man schwer sagen. Denn daß eine Verknüpfung dieser Art, auch wenn sie eine durch Erlernen ausgebildete ist, allmählich einen Grad von Festigkeit gewinnt, wie er hier vorzuliegen scheint, wird man doch nicht gerade als unmöglich bezeichnen dürfen. Von größerer Bedeutung ist aber, wie mir scheint, ein anderer Punkt.

Völlig deutlich würde jener soeben skizzierte Erlernungsprozeß doch nur dann sein, wenn in zahlreichen Fällen ein bestimmter physiologischer Vorgang oder Zustand mit dem irgendwie anderweit gegebenen Wissen verknüpft wäre, daß ein Körper sich an einem bestimmten Orte befindet. Der hier angenommene Erlernungsmodus setzt also ein auf anderer Grundlage beruhendes Wissen über die örtlichen Verhältnisse der Gegenstände voraus. Ein solches könnte auf andere Sinne (wie etwa den Tastsinn), oder auch die mit unserer Muskeltätigkeit verknüpften Eindrücke zurückgehen. Mit Recht aber wird man sagen, daß wir eigentlich keinen Anlaß haben, diesen eine direktere Verbindung mit räumlichen Vorstellungen zuzutrauen, als dem Gesichtssinn. Wollten wir aber, wie wir demgemäß konsequenterweise wohl müssen, eine direkt gegebene räumliche Bedeutung nicht nur für den Gesichtssinn, sondern für alle Sinne überhaupt ablehnen, so bliebe nur die Vorstellung von im Raume beweglichen Gegenständen als ein sozusagen rein intellektueller Ausgangspunkt übrig. Auf dieser Grundlage aber wird die Erlernung der Lokalisation kaum verständlich zu machen sein. Selbst wenn wir die Lokalzeichen als im Bewußtsein gegebene Empfindungsmerkmale annehmen, so ist nicht ersichtlich, was uns dazu bestimmen soll, sie auf räumliche Verhältnisse, eine Veränderung in bezug auf sie auf eine Bewegung zu beziehen.

Ganz unüberwindlich aber wird diese Schwierigkeit bei einer physiologischen Auffassung der Lokalzeichen erscheinen. Denn damit ein Erlernen in dem hiernach sich ergebenden Sinne, eine Verknüpfung physiologischer, im Bewußtsein nicht repräsentierter Zustände mit psychischen Erscheinungen stattfinden kann, dazu müßten doch eben auch die letzteren regelmäßig vorhanden sein. Es wäre also hier, wie dies soeben schon in der Formulierung eines solchen Erlernens ausgedrückt wurde, ein anderweit begründetes Wissen von den räumlichen Verhältnissen gesehener Gegenstände eine ganz unerläßliche Bedingung.

So drängen denn die Schwierigkeiten, die sich hier bieten, unzweifelhaft dazu, eine direkte auf bildungsgesetzlicher Basis beruhende Verknüpfung unserer optischen Empfindungen mit räumlichen Vorstellungen in Erwägung zu ziehen.

Hiermit betreten wir das Gebiet nativistischer Vorstellungen; und wir wenden uns demgemäß der Frage zu, wie wir uns solche bildungsgesetzlich gegebene, oder wie wir sagen wollen, primitive räumliche Bestimmungen denken können. Die hierauf bezüglichen Annahmen erfahren nun eine genauere Bestimmung durch einen Umstand, über den, wenn er auch nicht eigentlich streng erweisbar ist, doch keine ernsthaften Zweifel bestehen, vielmehr auch die am weitesten gehenden nativistischen Anschauungen mit denen der Empiristen zusammentreffen. Dies ist der, daß wir jedenfalls, wie die Kenntnis irgendwelcher besonderer Gegenstände überhaupt, so auch die unseres eigenen Körpers nicht als einen angeborenen, sondern als einen durch Erfahrung erworbenen

Besitz unseres Seelenlebens zu betrachten haben. Ist dies der Fall, so ergibt sich daraus sogleich (wie dies namentlich auch von HERING dargelegt worden ist), daß die primitiven räumlichen Bestimmungen zunächst lediglich eine Ordnung des gesehenen unter sich darstellen müssen, ohne eine Beziehung auf den Körper des Sehenden. Gehen wir hiervon aus, so müssen wir nun aber den tiefgreifenden Unterschied betonen, der räumliche Bestimmungen dieser Art von denjenigen trennen würde, die wir an uns als erwachsenen Menschen tatsächlich kennen. Was wir an unseren optischen Wahrnehmungen aufweisen können, insbesondere auch was sich hier als unmittelbar und zwingend gegebene Bestimmung herausstellt, das ist niemals etwas anderes als eine Beziehung zu unserem Körper, und es kann also schon aus diesem Grunde mit jenen primitiven Ortswerten unter keinen Umständen identifiziert werden. Dies ist zunächst schon insofern der Fall, als der Richtungseindruck (des ausgebildeten Sehens), abgesehen vom Netzhautort, immer noch durch den Stellungsfaktor mitbestimmt wird; diese beiden Momente ergeben, wie wir betonten (s. o. S. 467), den Ort des Gesehenen als ein völlig einheitliches Resultat. Der dem Gesehenen zukommende Ort ist also schon in dieser Hinsicht ein durch sicher empirische Verhältnisse mitbestimmtes, und er ist auch nach seiner unmittelbaren Qualifikation gar nicht anders, denn als eine Beziehung zu unserem Körper zu bezeichnen. Mit demselben Rechte, mit dem wir betonten, daß wir uns von einem nicht räumlich bestimmten optischen Eindruck keine Vorstellung zu machen vermögen, wird man auch sagen dürfen, daß wir uns keine Wahrnehmung eines Ortes zu denken imstande sind, die nicht durch seine räumliche Beziehung zu unserem Körper bestimmt wäre; eine räumliche Bestimmung oder einen Ortswert, der einer solchen Beziehung ermangelte, wird unsere Einbildungskraft vergeblich versuchen uns vorstellig zu machen.

Es ist allerdings von HERING versucht worden, diese Umwandlung in der verhältnismäßig einfachen Weise darzustellen, daß in die bildungsgesetzlich bestimmte primitive Ordnung der Sehdinge nachträglich die Vorstellung unseres Körpers eingefügt würde. Aber in den verschiedensten Hinsichten erweist sich doch diese Auffassung als nicht zutreffend und nicht zulänglich. Zunächst schon insofern, als sie der psychologischen Bedeutung des auf unseren Körper bezogenen (aus Netzhautort und Stellungsfaktor sich bestimmenden) Ortswertes nicht gerecht wird. Wenn bei Bewegungen des Auges mit dem Stellungsfaktor zugleich der Netzhautort sich in bestimmter Weise ändert und wir dabei einen Gegenstand an seinem Orte verharren sehen, so ist es das Konstantbleiben dieses Ortes, wovon wir in ganz zwingender und unmittelbarer Weise einen Eindruck haben; und es ist der Ort in diesem Sinne, was sich als die unmittelbar und fertig gegebene räumliche Bestimmung unseres Sehens ergibt. (S. o. S. 468.) Es hieße also die Erscheinungen völlig unzutreffend beschreiben, wenn wir sagen wollten, daß die Ortswerte der Seheindrücke sich durchgängig änderten, daß zugleich aber auch, der geänderten Stellung des Auges gemäß, unser Körper in abgeänderter Weise dem Sehraum eingefügt werde, und daß sich so die Vorstellung eines Verharrens relativ zu unserem Körper ergebe. Wollen wir einfach beschreiben, was in unserem Bewußtsein gegeben ist, so können wir nur sagen, daß der Ort des einzelnen Gesehenen als eine durchaus fertige und einheitliche Bestimmung unverändert bleibt.

Die dem ausgebildeten Sehen zukommenden Ortswerte mit den hier vermuteten primitiven zu indentifizieren, verbietet sich ferner auch schon im Hin-

blick darauf, daß unter besonderen Bedingungen, wie wir oben sahen, derselben Netzhautstelle durch eine Verdoppelung des Stellungsfaktors zwei verschiedene Ortswerte zukommen können. Würde die Vorstellung unseres Körpers nachträglich in den fest gegebenen Sehraum eingeordnet, so könnten die hier gegebenen Bedingungen höchstens dazu führen, diese Vorstellung unseres Körpers zu verdoppeln. Aber nicht dieses ist der Fall; sondern es kommt dazu, daß derselben Netzhautstelle oder zweien, die wir uns hinsichtlich ihrer primitiven Ortswerte übereinstimmend denken müßten, zwei ganz verschiedene Ortswerte zukommen, deren Unterschied von genau der nämlichen Art ist, wie der zwischen den Ortswerten zweier Netzhautstellen. Auch hierin zeigt sich der maßgebende Anteil, den der Stellungsfaktor an der Erzeugung der dem ausgebildeten Sehen eigenen Ortswerte zukommt.

In der entscheidendsten Weise endlich macht sich der Unterschied etwaiger primitiver und der im Sehen des Erwachsenen gegebene Ortswert bemerklich, wenn wir die Bedeutung dieser letzteren noch in einer anderen Hinsicht des genaueren erwägen. Die räumliche Bestimmung, die sich in unseren Seheindrücken als ein festgegebenes Element herausstellt, bedeutet ja eine auf einen Punkt unseres Körpers bezogene Richtung. Nur so können wir das bezeichnen, worin die Eindrücke zweier unmittelbar benachbarter Netzhautstellen unter allen Umständen sich stetig aneinander schließen. Für die dem Gesichtssinn eigentümliche räumliche Wahrnehmung ist es also durchaus charakteristisch, daß ihre Fundamentalbestimmungen sich gar nicht als den „Sehdingen" für sich zukommende Attribute auffassen lassen, sondern Beziehungen zu einem Punkte darstellen, der selbst nicht Gegenstand der optischen Wahrnehmung ist. Hier zeigt sich also nochmals mit besonderer Deutlichkeit, was wir vorhin schon hervorhoben, daß in die räumlichen Bestimmungen unseres ausgebildeten Sehens die Vorstellung eines nicht gesehenen und nicht sichtbaren Punktes als ein Element eingeht, von dem sie ihrer ganzen Natur nach nicht abgelöst werden können.

Denken wir uns demgemäß die optischen Empfindungen von Haus aus mit primitiven räumlichen Bestimmungen behaftet, so können wir darüber nicht im Zweifel sein, daß diese etwas von den uns bekannten und in unserem Bewußtsein gegebenen räumlichen Bestimmungen durchaus verschiedenes darstellen müssen, daß diese letzteren sich aus jenen nur durch einen Prozeß völliger Umarbeitung entwickeln können, bei dem wohl die relative Anordnung aller Elemente erhalten bleibt, die dem einzelnen zukommende Bedeutung aber vollständig umgewandelt werden muß.

Was wir hier von den Richtungseindrücken konstatieren, gilt ganz ähnlich auch für diejenigen der Entfernung. Vorhin schon wurde gezeigt, daß wir den Netzhautorten keine angeborenen' primitiven Tiefenwerte zuschreiben können, weil es durchaus unangebbar ist, welche dies eigentlich sein sollten. Lassen wir aber auch diesen Punkt beiseite, so werden wir, ganz in Übereinstimmung mit dem hinsichtlich der Richtungsanordnungen soeben dargelegten auch hier betonen müssen, daß die primitiven Tiefenwerte schon hinsichtlich dessen, was sie eigentlich bedeuten, von den dem ausgebildeten Sehen eigenen Bestimmungen ganz verschieden sein müßten. Die Tiefenbestimmung, wie wir sie am Sehen des Erwachsenen kennen, dasjenige, was bei Konstanz des Netzhautortes veränderlich ist, können wir auch wieder nur als den Ort auf einer von einem Punkte unseres Körpers ausgehenden Geraden als den Abstand von einem

bestimmten Punkte dieser Linie bezeichnen, wie dies ja auch darin zum Ausdruck kommt, daß wir das bei wechselnder Tiefe konstant bleibende eine Sehrichtung nennen. Die uns bekannte Art der Entfernungswahrnehmung ist also gleichfalls nicht zu trennen von der Vorstellung eines Punktes, der den Ausgangspunkt der Sehrichtungen bildet und von dem aus die Entfernungen gerechnet werden. Auch in unsere Tiefeneindrücke geht unter allen Umständen die Vorstellung eines selbst nicht gesehenen Punktes implizite ein. Soll daher den primitiven Sehempfindungen eine bestimmte Tiefenanordnung zugeschrieben werden, so werden wir mit Notwendigkeit dazu geführt, auch diese Tiefen- oder Entfernungswerte als etwas vorzustellen, was von dem in unserem Sehen bekannten durchaus verschieden ist.

Wenn wir daher im Anschlusse an HERING uns die primitiven räumlichen Bestimmungen in der Art denken, daß einerseits die jedem Netzhautort zukommenden Höhen- und Breitenwerte die Anordnung auf einer bestimmten (ebenen oder gekrümmten) Fläche, die primitiven Tiefenwerte eine Erstreckung senkrecht auf diese Fläche bedeuteten, so ist es klar, daß diese Bestimmungen von den uns bekannten, die sich als von einem Punkte ausgehende Richtungen darstellen und hierdurch ihre Bedeutung erhalten, prinzipiell verschieden sind.

Wir sehen hieraus, daß wenn wir angeborene (primitive) räumliche Bestimmungen annehmen, diese jedenfalls nichts bleibendes und unveränderliches sein können. Diese Tatsache ist nun für die uns hier eigentlich beschäftigende Frage nach der Natur der unseren räumlichen Wahrnehmungen zur Grundlage dienenden angeborenen Einrichtungen ohne Zweifel von Bedeutung. Schwerlich werden wir uns ja diese Grundlagen als etwas denken, was dem Prozeß des Erlernens zum Ausgang dient, dann aber völlig umgewandelt wird und zu existieren aufhört. Viel wahrscheinlicher ist jedenfalls, daß wir es mit Einrichtungen zu tun haben, die sich dauernd erhalten und auch in der Funktion des ausgebildeten Sehens noch ihre Rolle spielen. Gehen wir hiervon aus, so werden wir dazu geführt, jene bildungsgesetzlichen Grundlagen nicht oder wenigstens nicht in erster Linie darin zu erblicken, daß den Sehempfindungen von Haus aus gewisse primitive räumliche Bestimmungen zukommen, sondern in gewissen dauernden Einrichtungen, die für jenes primitive Sehen ebenso wie für das ausgebildete maßgebend sind. Solche Einrichtungen hätten wir uns durch irgend welche anatomischen oder physiologischen Verhältnisse gegeben zu denken, denen ein festes psychisches Korrelat nicht zukommt, die vielmehr mit psychischen Erscheinungen in mannigfaltiger und wechselnder Weise verknüpft werden können. Einer derartigen Einrichtung können wir es z. B. in leicht verständlicher Weise zuschreiben, daß in allen Fällen die den einzelnen Netzhautorten zukommenden Empfindungen in einer Weise geordnet sind, die mit der Ordnung der Netzhautpunkte übereinstimmt.

Die Notwendigkeit, jene bildungsgesetzlichen Grundlagen in gewissen anatomischen oder physiologischen Verhältnissen zu suchen, nicht in bestimmten psychisch angebbaren Qualitäten tritt noch deutlicher zutage, wenn wir an den anderen hier noch zu erwähnenden Punkt denken, bez. dessen sich eine bildungsgesetzliche Grundlage gleichfalls als wahrscheinlich herausgestellt hatte, die Beziehung der beiden Augen. Allerdings mögen wir als wahrscheinlich erachten, daß auch im primitiven Sehen die Eindrücke, die durch Belichtung zweier korrespondierender Punkte hervorgerufen werden, hinsichtlich ihrer Ortswerte teilsweise übereinstimmen. Wenn wir jedoch sagen, daß je zwei Punkte der

rechten und linken Netzhaut in dieser Beziehung zueinander stehen, so wird hierdurch das Verhältnis, das wir anzunehmen veranlaßt sind, nur sehr unzulänglich bezeichnet. Schon die Wettstreitsverhältnisse zeigen, daß zwischen den Reizerfolgen eines Auges ein gewisser engerer Zusammenhang, zwischen ungleichseitigen ein allgemeiner Unterschied stattfinden muß. Noch deutlicher drückt sich dies in der, unter besonderen Bedingungen entwickelten regionären Gestaltung des Wettstreits aus.[1] Nicht minder nötigen zur Annahme solcher Unterschiede die Verhältnisse der Tiefenwahrnehmung (die Unumkehrbarkeit des Reliefs). Es ist ferner hier an die Erscheinungen des Flimmerns bzw. der Verschmelzung zu erinnern in bezug auf die, wie SHERRINGTON[2] zeigte, ebenfalls ein engerer Zusammenhang der dasselbe Auge treffenden Reize sich bemerklich macht. Endlich wäre anzuführen, daß unter besonderen Bedingungen ja auch eine direkte Unterscheidung rechts- und linksäugiger Eindrücke möglich ist.[3] Sind wir nun andererseits doch in der Regel nicht in der Lage einen rechts- und linksäugigen Eindruck zu unterscheiden oder zwischen den durch das eine und andere Auge ausgelösten Empfindungen eine Verschiedenheit zu erkennen, so werden wir uns jenen unzweifelhaft bestehenden Unterschied der Reizerfolge wiederum als durch anatomische oder physiologische Verhältnisse gegeben denken müssen, die psychisch in ihren entfernteren Folgen bemerkbar werden können, aber nicht allemal bemerkbar werden müssen. Gerade mit Bezug auf den Zusammenhang der beiden Augen werden wir mit einer gewissen Notwendigkeit dazu geführt, uns jene bildungsgesetzlichen Grundlagen als anatomische oder physiologische, durch psychische Korrelate nicht, oder nur teilweise zu bezeichnende Beziehungen aufzufassen. Auf dem Boden dieser Auffassung wird es auch am ehesten verständlich erscheinen, daß die Beziehungen der Korrespondenz (der Richtungsgleichheit) keine ganz streng fixierten sind, wie wir das vorhin als wahrscheinlich gefunden haben.

Es ist wohl nicht überflüssig zu erwähnen, daß meines Erachtens die Frage nach der besonderen Natur, namentlich der anatomischen Bedeutung der hier als bildungsgesetzliche Grundlage angenommenen Verhältnisse gerade mit Bezug auf den Zusammenhang der beiden Augen auf besonders große Schwierigkeiten stößt. Der enge Verband zwischen korrespondierenden Punkten, dem dann andererseits wieder der durchgreifende Unterschied rechts- und linksäugiger Eindrücke gegenübersteht, stellt ein überaus merkwürdiges Verhalten dar, für das wir in keinem anderen Sinnesgebiete irgendeine Analogie kennen. Der Versuch, die hier liegenden Dunkelheiten aufzuklären, wird sicher erst gemacht werden können, wenn wir in die Vorgänge des Zentralnervensystems Einblicke gewonnen haben, von denen wir wohl zurzeit noch weit entfernt sind.

So führt uns denn eine genauere Prüfung der in nativistischem Sinne einem primitiven Sehen etwa zuzuschreibenden räumlichen Bestimmungen dahin, diesen doch nur eine sehr eingeschränkte Bedeutung zuzugestehen, einerseits insofern diejenigen des ausgebildeten Sehens von ihnen durchaus verschieden sein müßten und sich aus ihnen nur durch einen Prozeß verwickelter Umarbeitung entwickeln könnten, andererseits, sofern wir die eigentliche Grundlage für eine solche Entwickelung nicht sowohl in jenen primitiven Ortswerten als vielmehr in gewissen nur materiell (anatomisch oder physiologisch) aufzufassenden Verhältnissen er-

[1] Siehe oben S. 475.
[2] Siehe oben S. 431.
[3] Siehe oben S. 401.

blicken müssen. Ebensowenig sind wir in der Lage, uns von jenen, dem primitiven Sehen etwa zuzuschreibenden Ortswerten oder räumlichen Bestimmungen eine deutliche Vorstellung zu machen. Wir dürfen vielleicht vermuten, daß die allgemeine Vorstellung des Raumes, an der wir keine Veränderung kennen, auch ihnen schon zugrunde liegen wird. Jeder Versuch aber, sie uns irgendwie vorstellbar zu machen (wir können sie als dem Tastsinn ähnliche, flächenhafte, hinsichtlich der Tiefe unbestimmte usw. nennen), ist nur eine jedes sicheren Anhaltspunktes entbehrende und daher m. E. ebenso überflüssige, wie unersprießliche Anstrengung der Einbildungskraft.

Wir können unsere Betrachtungen hiermit abschließen; so vielfach dieselben uns auf zurzeit unbeantwortbare Fragen geführt haben, so gestatten sie uns, wie ich glaube, doch gewisse Ergebnisse zu resümieren, durch die wir uns mit der gestellten Aufgabe in einigermaßen befriedigender Weise abfinden können. Darüber vor allem wird kein Zweifel bestehen können, daß an den Lokalisationsgesetzen, wie wir sie beim Erwachsenen konstatieren können, sowohl bildungsgesetzliche Grundlagen als auch erfahrungsmäßige Ausbildung ihren Anteil haben. Auch können wir mindestens mit großer Wahrscheinlichkeit, die den einen und anderen Momenten zukommende Bedeutung etwas genauer darstellen.

Auf angeborene (bildungsgesetzlich fixierte) Verhältnisse können wir in erster Linie die den Netzhautorten entsprechende Anordnung der gesehenen Dinge im Gesichtsfelde zurückführen, nicht minder auch die dieser Wahrnehmung zukommende Eigentümlichkeit, daß zwischen den Eindrücken des rechten und des linken Auges kein Unterschied besteht, vielmehr die allen zukommende räumliche Bestimmung eine einheitliche ist. Auch dürfen wir annehmen, daß die normale Korrespondenzbeziehung gegenüber jeder stark abweichenden, durch ein bestimmtes bildungsgesetzliches Verhältnis bevorzugt ist; es ist aber sehr unwahrscheinlich, daß diese Beziehung eine absolut präzisierte ist, vielmehr mit Grund zu vermuten, daß die angeborene Anlage der empirischen Ausbildung einen gewissen Spielraum läßt, dessen Bereich und Bedeutung freilich eine quantitative Abschätzung nicht gestattet.

Haben in diesen Hinsichten bildungsgesetzliche (angeborene) Einrichtungen an der Gestaltung der Lokalisationsgesetze einen gewissen Anteil, so sind andererseits diejenigen räumlichen Bestimmungen, die das ausgebildete Sehen tatsächlich darbietet, sicherlich erworbene, schon insofern, als sie durchgängig Beziehungen zu unserem Körper darstellen und von der Vorstellung dieses selbst gar nicht getrennt werden können.

Ferner ist für die ganze Tiefen- (Entfernungs-) Wahrnehmung eine bestimmte bildungsgesetzliche Grundlage in hohem Grade unwahrscheinlich, weil die Bedingungen derselben so kompliziert und mannigfaltig sind, daß irgendeine bestimmte Festlegung hier kaum angenommen werden kann, jedenfalls nichts in dieser Beziehung sich durch irgendwelche tatsächliche Unterlagen wahrscheinlich machen läßt.

Auch für die Verhältnisse der Richtungslokalisation und für die binokularen Beziehungen können wir ferner die Bedeutung jener bildungsgesetzlichen Grundlagen nur als eine eingeschränkte betrachten, insofern, als die genauere quantitative Ausgestaltung durch sie wahrscheinlich nicht bestimmt, vielmehr empirischen Ursprunges ist, als die Korrespondenzbeziehung vermutlich auch eine nicht ganz streng fixierte ist, sondern einen gewissen, freilich zurzeit nicht

des genaueren zu veranschlagenden Spielraum gestatten dürfte, endlich insofern, als die Korrespondenzbeziehungen auch keine unabänderlich festgelegten sind, vielmehr die Entwickelung ganz abweichender hinsichtlich der Richtungseindrücke relativ leicht stattfindet, in anderen Hinsichten (Tiefenwahrnehmung) zwar auf größere Schwierigkeiten zu stoßen, aber doch auch möglich zu sein scheint. (S. o. S. 485.)

Kann daher auch vermutet werden, daß schon im nicht ausgebildeten (primitiven) Sehen die optischen Empfindungen räumlicher Natur, mit räumlichen Bestimmungen behaftet sind, so dürfen wir doch diese, dem primitiven Sehen etwa zuzuschreibenden räumlichen Bestimmungen mit denjenigen, die dem ausgebildeten Sehen eigen sind, nicht identifizieren; vielmehr werden wir uns die letzteren als Ergebnis eines Erlernungsprozesses denken müssen, der seinen Ausgang und seine Grundlage in Einrichtungen findet, denen auch jene primitiven räumlichen Bestimmungen zugehören. Das ausgebildete räumliche Sehen so kann man diese Anschauung etwa zusammenfassend ausdrücken' ist das Ergebnis eines Erlernungsprozesses, der jedoch durch bildungsgesetzliche Einrichtungen in gewissen Hinsichten vorbereitet, oder wie man vielleicht auch sagen kann, angefangen ist.

Die Erlernung müssen wir uns ohne Zweifel als einen Prozeß physiologischer Ausbildung denken, wie dies schon daraus hervorgeht, daß auch die Einrichtungen, die ihm zum Ausgang dienen, zum Teil sich nicht als psychische aufweisen lassen, sondern mit Wahrscheinlichkeit in gewissen anatomischen und physiologischen Einrichtungen erblickt werden müssen. Dieser ganze Erlernungsprozeß stellt sich namentlich auch hinsichtlich der Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit seiner Ergebnisse keineswegs als etwas Exzeptionelles oder Ungewöhnliches dar, sondern er findet auf anderen Gebieten zahlreiche Analogien, die uns die Bedeutung ähnlicher durch Ausbildung erworbener physiologischer Zusammenhänge erkennen lassen.

Einer sicheren Beurteilung entzieht sich gegenwärtig (abgesehen von den schon soeben erwähnten Punkten, hinsichtlich deren die Bedeutung der bildungsgesetzlichen Fixierungen fraglich erscheint), vor allem die psychologische Natur jener, dem primitiven Sehen etwa zuzuschreibenden räumlichen Bestimmungen; nicht minder aber auch die besondere Art der anatomischen oder physiologischen Einrichtungen, in denen wir uns jene bildungsgesetzlichen Grundlagen bestehend denken müssen, sowie auch die Art der für die Erlernung anzunehmenden physiologischen Substrate. Hier handelt es sich um Probleme, die zum Teil wohl ganz außerhalb des unserer Forschung zugänglichen liegen, zum Teil nicht mehr der physiologischen Optik, sondern anderen Disziplinen, besonders der Physiologie des Zentralnervensystems zugehören würden.

7. Über den Ursprung der Gesetze der Augenbewegungen.

Wir haben, wie oben bemerkt, unter den gleichen Gesichtspunkten, wie die Gesetze der Lokalisation, noch diejenigen der Augenbewegungen zu besprechen. Auch hier würde die Frage ganz allgemein dahin zu stellen sein, in welcher Hinsicht oder in welchem Umfange die an den Augenbewegungen zu bemerkenden Gesetzmäßigkeiten durch angeborene Einrichtungen vorbereitet sind, wieweit sie auf individueller Erfahrung oder Einübung beruhen. Bemerken wir zunächst, daß hier zweckmäßig zweierlei unterschieden werden kann. Die

uns bekannten Gesetzmäßigkeiten sind in erster Linie koordinatorische, d. h. sie bestehen darin, daß eine Tätigkeit der Augenmuskeln nur in ganz bestimmten Kombinationen möglich, in anderen ausgeschlossen ist. Sie betreffen andererseits aber auch die Art, wie diese Bewegungen ausgelöst werden können, die intentionellen Verhältnisse, wie wir kurz sagen wollen. Normalerweise kann, wie bekannt, jede Bewegung nur in bestimmter Weise hervorgerufen werden, und es hängt damit auch eine gewisse Beschränkung dessen zusammen, worauf sich unsere Bewegungsabsicht überhaupt richten kann. — Es wird ferner nützlich sein, hier einige allgemeine Bemerkungen vorauszuschicken, einerseits über die ganz allgemeinen Verhältnisse, durch die wir uns etwa das Erlernen einer Bewegung, die Ausbildung eines Bewegungsgesetzes, ganz ohne jede bildungsgesetzliche Grundlage ermöglicht denken können, andererseits darüber, was wir in bezug auf solche Vorbereitungen, ihr Vorkommen und ihre Bedeutung auf Grund anderweit bekannter Tatsachen anzunehmen berechtigt sind.

Was den ersteren Punkt anlangt, so wird für das Erlernen einer Bewegung die erste Bedingung selbstverständlich immer die sein, daß überhaupt eine Möglichkeit gegeben ist, die betr. Muskeln in Tätigkeit zu bringen. Es würde sich dabei, wenn wirklich keinerlei besondere Gestaltungen vorbereitet sind, um das handeln müssen, was wir etwa ein plan- und regelloses Herumprobieren nennen. Die spielenden, ungeordneten Bewegungen kleiner Kinder werden einem solchen Bewegungsmodus einigermaßen nahe kommen; in gewisser Weise vielleicht auch das tastende Probieren, wie es bei Erwachsenen vorkommt, wenn sie eine ganz neue Bewegung, z. B. die Hervorbringung eines fremdartigen Sprachlautes zu erlernen sich bemühen. Damit nun dies zum Erlernen einer bestimmten Bewegung führen kann, ist offenbar etwas weiteres erforderlich, was wir uns am zweckmäßigsten auch an dem eben erwähnten Beispiel, dem Versuch einen Sprachlaut hervorzubringen, veranschaulichen. Ist durch einen zunächst mehr oder weniger zufällig bewirkten Innervationsmodus einmal der gewünschte Laut hervorgebracht, so besteht offenbar die Möglichkeit, das hier Erreichte festzuhalten. Und zwar wird einerseits ein bestimmer Innervationszusammenhang durch dauerndes Festhalten oder wiederholtes Ablaufen zu einer festen Koordination ausgebildet, andererseits auch diese Bewegung mit der Vorstellung des sie begleitenden Erfolges derart verknüpft, daß die auf jenen Erfolg gerichtete Absicht den betr. Innervationsmodus auslösen oder hervorrufen kann. Wie dies eigentlich geschieht, welche Eigenschaften des Zentralnervensystems dabei in Betracht kommen, das entzieht sich vorderhand unserer Einsicht und darf jedenfalls hier unerörtert bleiben. Sicher ist nur, daß der Eindruck im bestimmten Augenblick den gewünschten Erfolg erreicht, die Bewegung richtig ausgeführt zu haben, noch allgemeiner ausgedrückt, irgendeine die betr. Bewegung und ihren Erfolg auszeichnende Bedeutung, dabei eine maßgebende Rolle spielen wird. Als die allgemeine Grundlage für die Ausbildung willkürlicher koordinierter Bewegungen können wir also die Tatsache bezeichen, daß, wenn der Erfolg einer Bewegung eine gewisse ausgezeichnete Bedeutung besitzt, die betr. Bewegung festgehalten und mit dem Eindruck jenes Erfolges verknüpft, also in koordinatorischer wie in intentioneller Beziehung fixiert wird.

Sind hierdurch für das Erlernen einer Bewegung ganz ohne bildungsgesetzliche Vorbereitung gewisse Möglichkeiten gegeben, so dürfen wir auf der anderen Seite an der allgemeinen biologischen Möglichkeit und dem Vorkommen

besonderer Vorbereitungen auch nicht zweifeln. Man hat in diesem Sinne und gewiß mit Recht) darauf hingewiesen, wie früh die neugeborenen Vierfüßler stehen und sich fortbewegen lernen. Unzählige andere Erscheinungen (ich will nur an den Gesang der Vögel erinnern) sind hier wohl von noch entscheidenderer Bedeutung. Eine Fülle von Tatsachen also läßt keinen Zweifel darüber bestehen, daß die Ausführung ganz bestimmter Bewegungen unter Umständen mit einer bis ins kleinste gehenden Genauigkeit bildungsgesetzlich vorbereitet und vorgezeichnet sein kann. Auch sind uns diese Einrichtungen wenigstens z. T. einigermaßen durchsichtig, namentlich insofern, als das Zusammenwirken, die gleichzeitige Tätigkeit zweier Muskeln, in einer nahen Benachbarung der zugehörigen Nervenursprünge ihr anatomisches Substrat zu finden scheint, während die Grundlage einer bestimmten zeitlichen Aneinanderreihung vorläufig dunkel ist.

Hierzu kommt ferner, daß in großem Umfange auch eine ganz bestimmte Auslösung solcher Bewegungen bildungsgesetzlich festgelegt sein kann in der Form der Reflexe. Es ist leicht zu sehen, daß hierdurch die intentionelle Anknüpfung der betr. Bewegungen in einfachster Weise vorbereitet sein kann. Tritt die Bewegung reflektorisch gerade unter Bedingungen ein, wo ihrem Erfolge jene vorhin berührte auszeichnende Bedeutung zukommt, so wird die Umwandlung des reflektorischen in einen intentionellen Zusammenhang sich ohne weiteres ergeben. So wird z. B., wenn das Erscheinen eines hellen Objektes im rechten Teile des Gesichtsfeldes zunächst reflektorisch eine Rechtswendung des Auges veranlaßt, damit in einfachster Weise eine Ausbildung vorbereitet sein, derzufolge die Wendung der Aufmerksamkeit auf ein rechts gelegenes Objekt und die Absicht, es zu fixieren, die gleiche Bewegung hervorbringt.

Wir wenden uns hiernach den Gesetzen der Augenbewegung zu, und zwar zunächst unter dem Gesichtspunkte der Koordination. Wir können dabei zweckmäßig die verschiedenen Punkte auseinander halten, die üblicherweise unterschieden werden, das Gesetz der binokularen Fixation, das der konstanten Orientierung, und das Listingsche Gesetz. Was zunächst das Gesetz der binokularen Fixation angeht, so könnte man dieses am ehesten als ein durch Einübung erworbenes zu betrachten geneigt sein. Denn der genauen Fixation kommt ohne Zweifel jene auszeichnende Bedeutung zu, die wir als maßgebenden Faktor für das Erlernen von Bewegungen vorhin besprochen hatten. In der Tat hat jede von ihr abweichende Stellung ein binokulares Doppeltsehen zur Folge, und wir können uns wohl denken, daß solches, wenn nicht immer, so doch in den meisten Fällen als Störung empfunden wird. Gemäß dem oben Gesagten könnte man also annehmen, daß die Innervationen sich in einer durch irgendeine bestimmte Regel nicht gebundenen Weise änderten, bis beide Augen auf denselben Punkt gerichtet sind, sobald aber dies erreicht ist, die hierfür erforderliche Innervation festgehalten wird. Obwohl m. E. prinzipiell die Möglichkeit einer solchen Ausbildung der binokularen Fixation nicht bestritten werden kann, muß ich doch gestehen, daß eine Entstehung rein auf dieser Grundlage m. E. für überaus unwahrscheinlich erklärt werden muß. Ist, wie wir sahen, die Möglichkeit einer bildungsgesetzlichen Vorbereitung bestimmter Bewegungen überhaupt gegeben und Verhältnisse dieser Art vielfach verwirklicht, so würde es, wie man wohl sagen darf, schwer begreiflich erscheinen, wenn für einen so typischen und dabei relativ einfachen Zusammenhang, wie er hier gegeben ist, eine solche Grundlage sich nicht entwickelt

hätte. Auch fehlt es nicht an besonderen Tatsachen, die dieser Annahme, wenn auch nicht zu strengem Beweis, doch in beachtenswerter Weise zur Stütze dienen können. So zunächst die Beobachtungen über die Augenbewegungen neugeborener Kinder. Gehen auch die hierüber vorliegenden Angaben im einzelnen beträchtlich auseinander, so scheint sich doch herauszustellen, daß meist schon in sehr früher Zeit eine Bevorzugung der assoziierten Bewegungen zu bemerken ist und daß sogen. atypische nur selten vorkommen.[1] Wenn ferner bei Erblindung eines Auges die Parallelbewegung der beiden Augen allmählich verkümmert und schließlich nahezu aufhört, so ist dies doch ein Vorgang, der sich überaus langsam, erst im Verlaufe vieler Jahre abzuspielen pflegt. Man wird daher wohl zugeben müssen, daß die Schnelligkeit, mit der der normale Zusammenhang sich ausbildet, zu der Schwierigkeit, mit der er, einmal entstanden, sich wieder löst, in einem gewissen Mißverhältnis steht, das eine bildungsgesetzliche Begründung sehr wahrscheinlich macht. Endlich aber darf hier geltend gemacht werden, daß die anatomische Untersuchung ja wirklich ganz bestimmte und eigenartige Anordnung der motorischen Nervenkerne ergeben hat,[2] deren Bedeutung, wenn auch nicht in jeder Richtung durchsichtig, doch sicherlich darin gesucht werden muß, daß sie bestimmte Innervationskombinationen begünstigt.

Die hier entwickelte Annahme gestattet leicht eine noch speziellere, freilich in mancher Hinsicht wohl schon unsichere Ausgestaltung. Geht man davon aus, daß normalerweise der Anstoß zu irgendeiner Augenbewegung im allgemeinen durch die Absicht gegeben ist, einen zunächst exzentrisch gesehenen Punkt zu fixieren, so läßt sich annehmen, daß die Impulse zu den Augenbewegungen sich nach den räumlichen Bestimmungen desjenigen Objektes richten werden, das jeweils Gegenstand unserer Aufmerksamkeit und Fixationsabsicht ist. Ist dies der Fall, so darf weiter vermutet werden, daß auch in den die Augenbewegungen auslösenden Impulsen vor allem jene Duplizität bemerkbar wird, die den räumlichen Bestimmungen des Gesehenen eigen ist, daß sie zu einem gewissen Teil durch die Richtung, zu einem anderen durch die Entfernung bestimmt sein werden, in denen wir den zu fixierenden Punkt sehen. Hiernach kann man denn in erster Linie eine bildungsgesetzliche Einrichtung annehmen, die der gleichzeitigen Tätigkeit der rechten und linken Heber bzw. Senker, Rechts- und Linkswender zugrunde läge; und man könnte in diesem Sinne von einem beidäugigen Mechanismus der Hebung, Senkung und Seitenwendung sprechen, wonach denn alle parallelen Blickbewegungen durch eine Inanspruchnahme dieser vorgebildeten Mechanismen in irgendeiner Kombination bewirkt werden würden. Neben dieser Einrichtung könnte sodann eine andere vermutet werden, die in ähnlicher Weise die Auslösung symmetrischer Konvergenzbewegungen vor-

[1] Vgl. hierüber Hering, Die Lehre vom binokularen Sehen § 6. — Donders, Pflügers Archiv XIII. S. 383. — Ders., Archiv f. Ophth. XVII. (2) 1871. S. 34. — Genzmer, Untersuchungen über die Seelentätigkeiten des neugeborenen Menschen. Diss. Halle 1873. — Raehlmann und Witkowski, Archiv f. Physiologie V. 1877. S. 454. Die von Raehlmann und Witkowski auch bei schon älteren Kindern (namentlich während des Schlafes) beobachteten atypischen Augenbewegungen legen übrigens die Frage nahe, ob nicht die ganze Funktion jener Bewegungsmechanismen, mögen sie nun angeboren oder durch Übung ausgebildet sein, unter allen Umständen an das Sehen geknüpft ist, während, wenn überhaupt nicht gesehen wird (z. B. bei geschlossenen Augen) sie ganz außer Spiel bleiben und Bewegungen der Augen in anderer Weise, etwa mit gänzlicher Umgehung jener Mechanismen, stattfinden können.

[2] Vgl. hierüber Zoth in Nagels Handbuch der Physiologie III. S. 327 f.

bereitete. — Es sind dies ungefähr die Vorstellungen, auf die man geführt wird, wenn man einer allgemeinen Tendenz zufolge geneigt ist, bildungsgesetzliche Grundlagen in möglichst weitgehender Weise anzunehmen. Ob sie wirklich von dieser Beschaffenheit sind oder ob sie die normalen Bewegungen in einer weniger bestimmten und detaillierten Weise vorbereiten, wird sich zurzeit nicht mit Sicherheit beurteilen lassen.

Mag man aber jene Grundlagen sich in dieser oder jener Weise vorstellen, ihnen viel oder wenig beimessen, darüber kann jedenfalls kein Zweifel bestehen, daß sie allein für die Erhaltung normaler Augenbewegungen (auch in der uns hier beschäftigenden Hinsicht) nicht ausreichen, sondern neben ihnen die allgemeinen Verhältnisse aller Einübung wirksam und unentbehrlich sind. Daß bei Aufwärtswendung des Blickes die rechten und linken Heber einer angeborenen Einrichtung zufolge zusammen in Tätigkeit treten, erscheint nicht befremdlich. Daß sie jedoch lediglich auf Grund einer solchen Einrichtung genau diejenigen Innervationsantriebe erhalten sollten, die zur binokularen Fixation eines hochgelegenen Objekts erforderlich sind, ist schwer glaublich, noch weniger, daß ein solches Verhältnis in den mannigfaltigen Wechseln des Wachstums und der Ernährung sich sozusagen von selbst erhalten sollte. In sehr einfacher Weise zeigen aber auch die sogen. Fusionsbewegungen die tatsächliche Möglichkeit korrigierender Modifikationen. Wir sehen, daß bei der Herbeiführung exzeptioneller Bedingungen (z. B. einer Höhenabweichung durch ein Prisma mit horizontaler brechender Kante) die Innervationszusammenhänge sich alsbald ändern, und zwar derart, daß im Laufe kurzer Zeit Abweichungen von mehreren Graden ausgeglichen werden. Wir werden nicht zweifeln können, daß in ähnlicher Weise auch Abweichungen beseitigt werden, die etwa ohne solche experimentelle Eingriffe entstehen, richtiger gesagt, daß das Ausbleiben irgendwelcher Abweichungen trotz der mannigfaltigen Ernährung und Wachstum beherrschenden Bedingungen einer beständigen Betätigung jener auch bei den Fusionen erkennbaren Verhältnisse zu verdanken ist. Dürfen wir es also einer angeborenen Vorbereitung zuschreiben, daß rechter und linker R. sup. gleichzeitig und annähernd gleich stark innerviert werden, so wird die genaue Fixierung dieses Stärkeverhältnisses doch sicher eine Sache der Sehkontrolle sein. Und wir können uns eine solche, wie vorhin schon berührt, den allgemeinen Gesetzen der Einübung gemäß durch die ausgezeichnete Bedeutung der binokularen Fixation gegeben denken.

In bezug auf die hier besprochenen Verhältnisse kann noch die Frage aufgeworfen werden, ob irgendwelche Abweichungen zufolge eines besonderen Zusammenhanges gerade diejenige Modifikation der Innervation hervorrufen, durch die sie korrigiert werden. Mir scheint, daß diese Annahme bzw. der Höhen- und Rollungsabweichungen auf große Schwierigkeiten stoßen würde und wohl auch kaum erforderlich ist. Denn bei kleinen Abweichungen, wie sie hier nur in Frage kommen, werden auch kleine regellose Schwankungen der Innervation genügen, um die richtige Augenstellung herbeizuführen; und es genügt daher, wenn gerade diese festgehalten wird. Bezüglich der Konvergenz unterliegt selbstverständlich das Bestehen einer direkten Fusionstendenz bei horizontal nebeneinanderstehenden Doppelbildern keinem Zweifel. Auf Natur und Ursprung dieser kommen wir unten zurück.

Erheblich verwickelter liegen die Dinge für das Gesetz der konstanten Orientierung und für das Listingsche Gesetz. Mit beiden sind zunächst Einrichtungen gegeben, die in einer uns verständlichen Weise für den Organismus

von Nutzen sind. Durch das Gesetz der konstanten Orientierung wird die Lokalisation in hohem Maße vereinfacht, der Stellungsfaktor (wie man den Sachverhalt kurz ausdrücken kann) auf eine Funktion von zwei statt drei Veränderlichen reduziert. Durch das LISTINGsche Gesetz werden die bei Bewegung des Auges auftretenden Scheinbewegungen auf ein Minimum reduziert; dies bedeutet seine Ableitbarkeit aus dem Prinzip der leichtesten Orientierung. (S. oben S. 120. Die Tatsache indessen, daß ein Verhalten dem Organismus nützlich ist, gewährt uns zunächst noch keinen Einblick in die Art seiner Entstehung. Mit Recht bemerkt daher auch HELMHOLTZ, daß mit dem Prinzip der leichtesten Orientierung die Art, wie sich das Drehungsgesetz tatsächlich entwickelt habe, nicht bezeichnet sein solle. Nach unserer gegenwärtigen allgemeinen Vorstellung dürfen wir die Entwickelung eines dem Organismus nützlichen Verhaltens dann verständlich finden, wenn dasselbe ein vererbbares ist. Die erwähnten Tatsachen könnten somit zur Erklärung der Drehungsgesetze herangezogen werden, wenn wir eine bildungsgesetzliche Festlegung derselben für das Individuum annehmen dürfen. Was oder wieviel in dieser Hinsicht vorausgesetzt werden muß, das wird nun offenbar wieder davon abhängen, was die individuelle Ausbildung mit Sicherheit herbeizuführen imstande ist. In dieser Hinsicht ist ja nun klar, daß die vorhin erwähnten Momente des binokularen Doppeltsehens hier nicht herangezogen werden können. Denn auch bei beliebigen anderen Drehungsgesetzen, auch wenn das Gesetz der konstanten Orientierung nicht bestünde, könnte sehr wohl ein bestimmter, die Diplopie ausschließender Zusammenhang beider Augen festgelegt sein. Wohl dagegen ist hier an das namentlich von FICK betonte Prinzip der geringsten Muskelanstrengung zu denken. Hier wie überall wird ohne Zweifel die Tendenz der Einübung dahin gehen, einen bestimmten Bewegungserfolg auf die bequemste Weise, mit der geringsten Anstrengung zu erreichen. Ist dies der Fall, so wird die (phylogenetische) Entwickelung eines bestimmten Bewegungsmodus nicht anders stattfinden können, als parallel mit der Entwickelung einer Muskelanordnung, für die jener Bewegungsmodus der bequemste ist. Andererseits wird dann aber auch die Entwickelung einer solchen Muskelanordnung genügen, um die Entstehung jenes Bewegungsmodus sicherzustellen. Im Hinblick auf die Einübung nach Maßgabe der geringsten Anstrengung ist also die Entwickelung der Drehungsgesetze verständlich zu machen (als nützlicher Einrichtungen), auch wenn wir nur die anatomische Bildung der Muskeln als vererbbar und bildungsgesetzlich festgelegt betrachten, während die entsprechende Annahme für den Bewegungsmodus selbst entbehrlich erscheint. Damit ist natürlich nicht gesagt, daß nicht auch der Bewegungsmodus durch Vererbung festgelegt oder verbreitet sei; nur haben wir keinen entscheidenden Grund dies anzunehmen.

Im ganzen ergibt sich demnach, daß wir die Entwickelung der Drehungsgesetze, als für den Organismus nützlicher, einerseits auf die vererbbare anatomische Bildung des Muskelapparates zurückführen können, andererseits in einer nach unserem gegenwärtigen Wissen nicht abgrenzbaren Weise entweder auf die Vererbung der bestimmten Bewegungsmodalitäten selbst oder auf die Entwickelung dieser Bewegung als der bei der betr. Muskelanordnung bequemsten.

Wenn wir vorhin erwähnten, daß die Verhältnisse des binokularen Sehens zur Erklärung der speziellen Drehungsgesetze nicht herangezogen werden können, so bedarf dieser Satz noch einer gewissen Einschränkung. Es scheint mir nämlich nicht

zu bezweifeln, daß der Zusammenhang beider Augen, wenn er auch nicht zu der Entstehung gerade eines bestimmten Drehungsgesetzes führen kann, doch die Entstehung irgendeines solchen Gesetzes zu begünstigen und seine Erhaltung sicherzustellen geeignet ist. Muß eine bestimmte Bewegung (z. B. die Wendung des Blickes nach rechts und oben) jedenfalls für beide Augen in genau übereinstimmender Weise ausgeführt werden, so wird dabei die Gewöhnung an einen ganz bestimmten Bewegungsmodus ohne Zweifel leichter eintreten, als wenn es sich um ein einzelnes ganz unabhängiges Auge handelte. Und noch durchsichtiger ist die Erhaltung und Sicherung eines bereits entwickelten Bewegungsgesetzes durch den binokularen Zusammenhang. Geringe Abweichungen von den Drehungsgesetzen werden zufolge aller möglichen zufälligen Modifikationen in bezug auf Ernährungs- und Leitungsverhältnisse immer vorkommen. Die überwiegende Mehrzahl derselben wird naturgemäß unsymmetrisch oder einseitig sein und demgemäß schon durch die Verhältnisse des binokularen Sehens ausgeglichen werden. Für beidäugig übereinstimmende Abweichungen, denen gegenüber diese Korrektion versagt, wird naturgemäß überhaupt nur eine geringe Chance gegeben sein.

Wir haben die Augenbewegungen bis jetzt lediglich unter dem Gesichtspunkt der Koordination betrachtet und haben nun noch ihre intentionellen Verhältnisse, die Bedingungen ihrer Auslösung ins Auge zu fassen. Normalerweise liegt der Anstoß jedenfalls ganz überwiegend darin, daß die Aufmerksamkeit einem exzentrisch gesehenen Punkte zugewendet wird. Wie vorhin schon angedeutet, ist es wohl sehr wahrscheinlich, daß diese Intentionierung durch angeborene reflektorische Zusammenhänge vorbereitet ist. Wenn helle oder sonst auffällige (z. B. bewegte) Gegenstände in exzentrischen Teilen des Gesichtsfeldes von Haus aus eine Wendung des Blickes nach der betr. Seite reflektorisch auslösen, so ist dadurch die intentionelle Anknüpfung der assoziierten Bewegung in einfacher und verständlicher Weise vorbereitet.

Zweifelhafter kann es wohl erscheinen, ob eine analoge Annahme für einen etwaigen Konvergenzmechanismus gemacht werden kann, vor allem wegen der verwickelten Bedingungen, von denen wir uns einen Reflex dieser Art abhängig denken müßten. Man wird es also hier vielleicht eher für wahrscheinlich halten dürfen, daß die Tätigkeitsbedingungen dieses Mechanismus sich erst allmählich, parallel der ganzen Ausbildung der Tiefenwahrnehmung entwickeln.

Die Annahme eines angeborenen Konvergenzreflexes könnte man geneigt sein, auf die oben erwähnte Fusionstendenz bei horizontal nebeneinanderstehenden Doppelbildern zu stützen. Allein es muß doch geltend gemacht werden, daß auch, wenn willkürliche Bewegungen sehr häufig unter bestimmten Bedingungen ausgelöst werden, dies in bekannter Weise zu Entwickelung fester, einem Reflex ähnlicher Gewöhnungen führt. Nach Maßgabe der allgemeinen Bedingungen binokularer Fixation ist es also durchaus verständlich, wenn sich ein relativ fester Zusammenhang von der Art entwickelt, daß bei Doppelbildern die zu ihrer Beseitigung erforderlichen Bewegungen (Vermehrung oder Verminderung der Konvergenz) ohne weiteres eingeleitet werden. Zugunsten dieser Auffassung spricht auch, daß jene Fusionstendenz keine sehr starke ist und durch die Absicht, Doppelbilder zu sehen, leicht überwunden werden kann.

Wenn unter normalen Umständen Augenbewegungen nur durch die Absicht den Blick hier- oder dorthin zu wenden, ausgelöst werden können, so liegt hierin offenbar eine wichtige Beschränkung; und es wird sich fragen, worauf wir diese zurückzuführen haben oder welche Bedeutung sie besitzt. Auf den ersten Blick kann diese Frage wohl als gegenstandslos erscheinen; denn es versteht sich, daß Bewegungen, die koordinatorisch unmöglich sind, auch nicht intendiert

werden können. Wenn aber auch dies selbstverständlich ist, so kann doch die Frage erhoben werden, ob die nach Maßgabe der Koordinationsgesetze möglichen Bewegungen nur in der gewöhnlichen oder auch auf andere Weise, d. h. durch andere Bewegungsabsichten, als die der Blickwendung und der Fixation, hervorgerufen werden können. Und wir haben hier die m. E. nicht unwichtige Tatsache anzuführen, daß dies in der Tat sehr wohl möglich ist. Es ist dies z. B. der Fall, wenn wir uns einüben (was bekanntlich mit Leichtigkeit gelingt) einen Gegenstand einfach oder in Doppelbildern zu sehen. Nach einiger Übung richten wir den Konvergenzgrad ohne weiteres nach den Doppelbildern. Die Absicht, sie weiter auseinandertreten zu lassen oder einander anzunähern, ev. sie zum Verschwinden zu bringen, bestimmt alsdann die Bewegungen ebenso direkt, wie sonst die Absicht einen Punkt zu fixieren, und wie überall die auf einen bestimmten Erfolg gerichtete Intention die entsprechende Bewegung auslöst. Die Intentionierung unserer Augenbewegungen gestattet also eine sehr mannigfaltige Ausgestaltung, sobald aus irgendeinem Grunde jene besonderen Seherfolge unsere Aufmerksamkeit erregen. Wie mir scheint, ist diese Tatsache insofern von Bedeutung, als sie die Annahme irgendwelcher bildungsgesetzlichen Einrichtungen, vermöge deren unsere Bewegungsabsichten von vornherein in bestimmter Weise beschränkt wären, entbehrlich und sogar unwahrscheinlich macht. Sie spricht vielmehr für die einfache Vorstellung, daß jeder durch die Koordinationsgesetze ermöglichte Bewegungserfolg auch Gegenstand einer Bewegungsabsicht werden kann. Und wenn für gewöhnlich die Augenbewegungen eben nur durch eine Fixationsabsicht ausgelöst werden, so hat dies seinen Grund darin, daß (sofern nicht das besondere Interesse einer wissenschaftlichen Beobachtung ins Spiel kommt) jene anderen Bewegungserfolge (die Doppelbilder) für uns keine Bedeutung besitzen und nur als Störung empfunden werden.

Zugunsten dieser Annahme spricht auch die Tatsache, daß unter exzeptionellen Bedingungen gelegentlich auch abweichende Bewegungen willkürlich hervorgerufen werden können. Bei mir selbst hat sich durch das Studium meiner Sehweise, der Diplopien, Wettstreitserscheinungen usw. die Möglichkeit typisch einseitiger Bewegungen entwickelt. Ich kann, indem ich mit dem linken Auge einen Punkt dauernd fixiere, das rechte Auge abweichen lassen oder bis zur genauen binokularen Fixation wieder annähern. Nicht ebenso gelingt mir eine isolierte Bewegung des linken Auges bei Dauerfixation des rechten. Hier macht sich in der Tat immer auch eine Unruhe des rechten Auges bemerkbar, die gestattet, die einseitige Bewegung in der von Hering angenommenen Weise als Kombination von assoziierter Seitenwendung und einer Änderung der Konvergenz aufzufassen. Dieses sehr charakteristische und leicht bemerkbare Verhalten ist aber in dem ersterwähnten Falle (Adduktion des rechten Auges) sicher nicht vorhanden. Ich bin daher nicht darüber im Zweifel, daß hier wirklich eine typisch einseitige Innervation erlernt ist. Auch kann ich bei Divergenzstellung willkürlich das Höhenverhältnis der beiden Augen um ca. 2 Grad ändern, wodurch sich die durch Konfundierung benachbarten Halbbilder der rechts- und linksäugig fixierten (oder annähernd fixierten) Gegenstände bezüglich der Höhe gegeneinander verschieben. Ähnliche Erscheinungen sind auch anderweit mehrfach beobachtet worden[1].

[1] Weinhold, Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde. 1903. — Bielschowsky, Über die Genese einseitiger Vertikalbewegungen der Augen. Zeitschrift f. Augenheilkunde XII.

Man kann der hier entwickelten Auffassung die Frage entgegenstellen, warum es uns dann nicht auch gelingt, das Hervorbringen von Höhenabweichungen zu erlernen. Nehmen wir an, wie wir es oben als wahrscheinlich darlegten, daß geringe Abweichungen dieser Art fortwährend eintreten, so könnte man es für ein Postulat der hier angenommenen allgemeinen Erlernungsfähigkeit halten, daß uns auch die Festhaltung solcher Höhenabweichungen gelingen müßte, wenn wir unsere Aufmerksamkeit darauf richten und es darauf anlegen. Man wird indessen doch beachten müssen, daß für die Fixierung eines Bewegungserfolges wohl immer eine gewisse Auffälligkeit und Greifbarkeit desselben erforderlich sein dürfte. Beschränken sich zufolge einer bereits ausgebildeten Koordination jene Abweichungen auf ein kaum merkbares Minimum, so kann es nicht wundernehmen, daß es uns nicht gelingt, sie festzuhalten und zu ihrer willkürlichen Hervorbringung zu gelangen. Ob das gleiche auch schon für die vermutlich weit weniger strenge Koordination des Neugeborenen gilt, kann in der Tat sehr bezweifelt werden. Und in bezug auf diese darf man daher wohl mit einiger Wahrscheinlichkeit sagen, daß für die Nichterlernung solcher Bewegungen, die z. B. eine Höhenabweichung bewirken, auch der Umstand maßgebend in Betracht kommt, daß diesen jene mehrerwähnte auszeichnende Bedeutung abgeht, daß sie kein Interesse besitzen.

Das Ergebnis, zu dem wir hier im ganzen gelangen, ist dem, welches wir mit Bezug auf die Lokalisationsverhältnisse erhielten, sehr ähnlich. Denn die obigen Betrachtungen lehren in erster Linie, daß die am normalen erwachsenen Menschen zu konstatierende Gesetzmäßigkeit der Augenbewegungen jedenfalls zum Teil auf angeborene oder ererbte Einrichtungen, zum Teil aber auch auf individuelle Einübung zurückgeführt werden muß. Den ersteren werden wir eine Begünstigung bestimmter Innervationskombinationen zuschreiben müssen. In der letzteren Hinsicht dürfen wir zunächst annehmen, daß auch hier das allgemeine Prinzip aller Bewegungseinübung maßgebend ist, demzufolge wir diejenigen Bewegungsmodalitäten festzuhalten imstande sind, deren Erfolg eine für uns ausgezeichnete Bedeutung besitzt. Für den Gang dieser Einübung ist dann weiter die Tatsache bestimmend, daß eine solche auszeichnende Bedeutung der binokularen Fixation und im allgemeinen nur ihr zukommt. Wir dürfen es wohl hiermit in Verbindung bringen, daß es normalerweise keine Augenbewegungen gibt, für die die auslösende Intention in etwas anderem als einer bestimmten Fixationsabsicht bestünde. Jedenfalls aber müssen wir auf jenen Umstand die beständige Kontrolle zurückführen, die für eine dauernde Erhaltung des Gesetzes der binokularen Fixation ohne Zweifel erforderlich ist. Auch die überall bemerkbare Tendenz, jeden Bewegungserfolg möglichst bequem, mit der relativ geringsten Muskelanstrengung auszuführen, dürfte bei der Ausbildung der Bewegungsgesetze eine gewisse Rolle spielen. Eine genauere Bewertung der einen und anderen Verhältnisse, der der bildungsgesetzlichen Festlegung und der Einübung zukommenden Bedeutung, ist selbstverständlich zurzeit in keiner Weise möglich. Hierzu wäre eine quantitative Ermittelung desjenigen Spielraumes erforderlich, den im Augenblicke der Geburt die bildungsgesetzlichen Einrichtungen gestatten; an eine solche ist aus mehr als einem Grunde nicht zu denken.

S. 545. 1904 — Lechner, Abnorme willkürliche Augenbewegungen. Archiv f. Ophthalmologie XLIV. S. 58. 596. 1897. — Peters, Über das willkürliche Schielen des einen bei Primärstellung des anderen Auges. Klin. Monatsblätter f. Augenheilkunde. 45. S. 46. 1907.

8. Historisch-kritische Bemerkungen.

Es ist an sich von hohem Interesse, überdies aber auch schon durch den besonderen Zweck und Anlaß dieser Darstellung geboten, noch des genaueren darzulegen, wieweit sich die Ergebnisse, zu denen wir gelangt sind, den seinerzeit von HELMHOLTZ vertretenen Anschauungen noch anschließen, wieweit sie sich von ihnen entfernen oder über sie hinausgehen. Eine Erörterung dieser Verhältnisse ist jedoch nicht möglich, ohne auch zugleich auf die von HELMHOLTZ bestrittenen und abgelehnten Vorstellungen in gewissem Maße einzugehen; und es mag daher gestattet sein, die obigen Darlegungen durch einen etwas allgemeineren historischen Überblick abzuschließen, bei dem wir uns allerdings darauf beschränken können und dürfen, aus der ganzen Entwickelung, die die Lehre von der Raumvorstellung und den räumlichen Wahrnehmungen darbietet, einige für uns vorzugsweise bedeutungsvolle Phasen herauszugreifen.

Wiewohl selbstverständlich Anfänge der uns hier beschäftigenden Gedanken viel weiter zurückverfolgt werden können (es sei hier nur an LOCKES Unterscheidung primärer und sekundärer Qualitäten erinnert), so können wir unseren Überblick doch mit KANT beginnen. Wir sind gewohnt, das, was er in bezug auf unseren Gegenstand gelehrt hat, schlechtweg als die Apriorität der Raumanschauung zu bezeichnen. Es muß nun hier sogleich hervorgehoben werden (wenn auch hier nicht des genaueren darauf eingegangen werden kann), daß es sich hierbei um zweierlei ganz verschiedene, auch von KANT selbst wohl nicht immer genügend auseinandergehaltene Dinge handelt, einerseits die Evidenz, den Gültigkeitsmodus gewisser auf den Raum bezüglicher Sätze, ein a priori im logischen Sinne, andererseits um gewisse, mit dem Worte a priori nicht gerade sehr glücklich bezeichnete, psychologische Tatsachen. Uns interessiert hier nur der letztere Punkt.

In bezug auf diesen nun besagt die KANTsche Lehre, daß die Raumvorstellung ein einheitliches und unveränderliches Element unseres Seelenlebens sei. Wie oben schon besprochen, muß meines Erachtens dieser Behauptung insofern unbedingt zugestimmt werden, als in der Tat alle von uns erlebten und alle uns vorstellbaren Veränderungen sinnlicher Wahrnehmung immer nur darin sich unterscheiden, daß an demselben Orte verschiedenes wahrgenommen werden kann, während die Gesamtheit der Orte selbst sich in einer durchaus unveränderlichen Weise eben zu dem zusammenschließt, was wir den Raum nennen. Diesen selbst können wir uns niemals durch Fortfallen eines Teiles vermindert, oder durch ein Hinzutreten vermehrt, noch überhaupt in irgendeiner Weise verändert denken. Ist nun aber auch der Raum die ein für allemal gegebene und unveränderliche Form unserer sinnlichen Wahrnehmung, so bleibt die weitere Frage bestehen, in welcher räumlichen Ordnung, d. h. an welchen Orten bei jedem Zustande unserer Sinnesorgane das einzelne Empfundene sich darstellt, die Frage, wie wir es oben ausdrückten, nach den besonderen Verhältnissen der Lokalisation. Da sich diese jedenfalls nach der jeweiligen Affizierung unserer Sinne durch die Außenwelt, also nach dem Verhalten der Sinnesorgane, sodann des Gehirns wird richten müssen, so ist klar, daß wir es hier mit einem Problem zu tun haben, das einen Teil der allgemeinen Lehre vom psychophysischen Zusammenhange ausmacht. Fragt diese ganz allgemein, in welcher Weise die Bewußtseinserscheinungen durch die physischen Prozesse des Gehirnes sei es bestimmt, sei es beeinflußt werden, so ist ein Teil dieser

Frage auch der, wie sich die räumlichen Verhältnisse des Wahrgenommenen, die subjektive räumliche Ordnung durch die objektiv gegebenen Umstände, insbesondere auch objektiv verwirklichte räumliche Anordnungen äußerer Gegenstände, der Vorgänge in den Sinnesorganen, im Gehirn) bestimmen.

Diese Frage, wie wir betonen müssen, kann und muß auch vom Kantschen Standpunkt aus aufgeworfen werden, und man darf sich hierüber insbesondere dadurch nicht täuschen lassen, daß hier von der objektiv verwirklichten räumlichen Ordnung gesprochen wird, während doch nach Kant der Raum eine subjektiv bestimmte Anschauungsform sein soll. Denn auch bei dieser Auffassung wird ja die empirisch feststehende Tatsache in keiner Weise erschüttert werden, daß die äußeren Gegenstände auf unsere Sinnesorgane einwirken, und daß gewisse hierdurch ausgelöste Vorgänge des Gehirns, wie sie in unsere Bewußtseinserscheinungen überhaupt eingreifen, so auch bestimmte räumliche Wahrnehmungen ergeben. Auch diese Auffassung also ändert nichts an dem Auseinanderfallen einer von irgendeinem Subjekt im Augenblick wahrgenommenen räumlichen Ordnung und derjenigen, die wir die objektiv verwirklichte nennen. Wenn wir im Kantschen Sinne die Subjektivität der Raumvorstellung sowie unseres Wirklichkeits-Denkens überhaupt betonen, so würden wir nur für dies, was wir die objektiv verwirklichte räumliche Anordnung nennen, eine andere Bezeichnung zu wählen haben.

Wie es nun gekommen ist, daß Kant diese Frage unberührt gelassen hat, ob er sie ganz übersah, ob er sie irrigerweise für eine so selbstverständlich sich beantwortende hielt, daß ihre Erörterung für überflüssig gelten konnte, oder ob er das hier vorliegende Problem als ein außerhalb seiner Aufgabe liegendes absichtlich unbehandelt ließ, das darf hier dahingestellt bleiben. Jedenfalls werden wir aber, je rückhaltloser wir Kants Lehre von der Einheitlichkeit und Unveränderlichkeit der Raumvorstellung beizupflichten geneigt sind, um so nachdrücklicher betonen müssen, daß hier eine von Kant nicht beantwortete, ja nicht einmal ausdrücklich aufgeworfene Frage vorliegt. Als diejenigen, die diese Frage zuerst in ganz klarer Weise (übrigens durchaus auf dem Boden der Kantschen Lehre) aufgeworfen und zu beantworten gesucht haben, möchte ich hier Lotze und Joh. Müller nennen.

Ausgehend von der Einheitlichkeit, die der Gesamtheit des räumlich Wahrgenommenen als dem Bewußtseinsinhalt der Seele zuzuschreiben sei, war Lotze vor allem der Meinung, daß es unzulässig sei, in der objektiv gegebenen räumlichen Ordnung irgendwelcher nervöser Vorgänge ohne weiteres den genügenden Grund für die räumlichen Verhältnisse des Wahrgenommenen, für die subjektive räumliche Ordnung zu finden. Die Seele müsse vielmehr diese räumliche Ordnung aus irgendwelchen, den einzelnen Empfindungen anhaftenden Merkmalen konstruieren. So ergab sich ihm die Lehre von den Lokalzeichen als Eigentümlichkeiten, durch die sich die sonst übereinstimmenden Empfindungen je nach dem Orte ihrer Provenienz unterscheiden, Eigentümlichkeiten, die als Empfindungsbeschaffenheiten den sonstigen Qualitäten vergleichbar, jedenfalls nicht unmittelbar räumlicher Natur sein, die vielmehr der Seele nur die Möglichkeit einer Unterscheidung gewähren sollten, auf Grund deren sie zu einer räumlichen Ordnung der einzelnen Wahrnehmungselemente, zu einer Lokalisation gelangen würde. Zwei Punkte dürfen wir an der Lotzeschen Lehre als besonders beachtenswert hervorheben. Der eine ist der, daß hier durchaus im Kantschen Sinne neben den Lokalzeichen der sinnlichen Eindrücke die Raumvorstellung als etwas Selbständiges und von vornherein Gegebenes betrachtet wird. Der andere betrifft die weiteren Verhältnisse der

hiermit angenommenen Ausbildung der räumlichen Wahrnehmung. Ist den Empfindungen von vornherein nicht ein Ortswert eigen, sondern ein Merkmal anderer Art, das die Seele irgendwie veranlaßt, dem Empfundenen einen Ort zuzuschreiben, so ist damit die Lokalisation als eine psychische Tätigkeit aufgefaßt, die den allgemeinen Gesetzen psychischen Geschehens unterstehen wird. Die Theorie der Lokalzeichen führt also, wenn auch LOTZE selbst diese Verhältnisse nicht des genaueren ins Auge faßt, doch ganz naturgemäß darauf, die Lokalisation, die Verknüpfung der Lokalzeichen mit Ortswerten, als etwas aufzufassen, was durch allmähliche Erlernung sich feststellt. Erscheint hiernach die Theorie LOTZES als Ausgangspunkt, ja recht eigentlich als Vorstufe des HELMHOLTZschen Empirismus, so können wir auch weiter hinzufügen, daß es sich hier zweifellos um eine durchaus bewußte Anknüpfung handelt, wie dies schon in der Benutzung des von LOTZE herrührenden Ausdruckes Lokalzeichen sich bemerklich macht, eines Begriffes, der ja ein Kardinalbegriff der LOTZEschen sowohl wie der HELMHOLTZschen Lehre genannt werden kann. Wenn indessen eine historische Betrachtung berechtigt ist, den HELMHOLTZschen Empirismus in diesen Zusammenhang zu bringen, so wird man doch, um die Tatsachen richtig aufzufassen, weiter betonen müssen, daß der eigentliche Ausgangspunkt der HELMHOLTZschen Theorie ein ganz anderer war, als die Probleme, die LOTZE beschäftigt, oder die Lösung, die dieser für sie gefunden hatte. Der Ausgangspunkt der HELMHOLTZschen Untersuchung (das muß eine richtige Beurteilung des historischen Zusammenhanges vor allem im Auge behalten) war die sinnesphysiologische Detailuntersuchung. Diese führte HELMHOLTZ auf die Fülle von Tatsachen, in denen sich die Lokalisation als ein verwickelter, durch Erfahrung und Einübung zu erwerbender, in mannigfacher Weise veränderlicher Zusammenhang ergab. Wenn HELMHOLTZ für diese Tatsache nach einer Deutung und befriedigenden Formulierung suchte, so bot sich ihm bei dem damaligen Stande der allgemeinen Anschauungen keine andere als die, die im Erlernen einen dem physiologischen Geschehen gegenüberzustellenden psychischen Prozeß erblickte, und er wurde so auf die Vorstellungen LOTZES als diejenigen geführt, in denen sich seine Ergebnisse am greifbarsten formulieren und den allgemeinen Anschauungen am besten einfügen ließen.

Eine weitere Komplikation wurde nun aber dadurch herbeigeführt, daß HELMHOLTZ nicht nur die besonderen Verhältnisse der Lokalisation, sondern auch die Raumvorstellung selbst als etwas erfahrungsmäßig Erworbenes glaubte in Anspruch nehmen zu müssen. Abgesehen von den auf anderen Gebieten liegenden und hier nicht zu berührenden Schwierigkeiten, in die er hierdurch verwickelt wurde, ist auch die Theorie der Lokalisation hierdurch nicht verständlicher gemacht, sondern in hohem Grade erschwert, ja einer ihr unentbehrlichen Grundlage beraubt worden. Denn wenn, wie soeben erwähnt, die Theorie LOTZES gerade, indem sie die Raumanschauung als etwas neben den Empfindungen und ihren Lokalzeichen von vornherein Gegebenes betrachtete, für eine Entwickelung der Lokalisation in empiristischem Sinne die ausreichenden Grundlagen bot, so werden wir die Entwickelung einer räumlich geordneten Wahrnehmung allein aus den in den Lokalzeichen gegebenen unräumlichen Beschaffenheiten durchaus unverständlich finden müssen. In der Tat ist denn auch nicht zu bestreiten, daß HELMHOLTZ, indem er den Empirismus auf die Raumanschauung als solche ausdehnen wollte, zu einer Theorie gelangte, die eine Lücke aufweist,

und an der Stelle, wo wir eine feste Grundlage fordern müssen, in der Luft schwebt. Diese Lücke macht sich am deutlichsten da bemerklich, wo Helmholtz bei der Auseinandersetzung der Lokalisationstheorie gleichfalls genötigt ist, neben den Lokalzeichen auch die Raumvorstellung als solche schon irgendwie als gegeben vorauszusetzen und diesen Punkt mit dem (jedenfalls nicht befriedigenden) Hinweise erledigt, es dürften die allgemeinsten Verhältnisse der Raumvorstellung als durch den Tastsinn gegeben vorausgesetzt werden. (S. o. S. 433.)[1]

Der Versuch, die inneren Beziehungen der an die Namen von Kant, Lotze und Helmholtz geknüpften Lehren darzustellen, führt, wie aus dem Obigen hervorgeht, zu der Einsicht, daß solche Beziehungen zwar zweifellos vorhanden, daß sie aber doch keineswegs einfacher Natur sind.

Die Dinge stellen sich in vieler Hinsicht ähnlich dar, wenn wir eine Linie verfolgen, die von Kant über Joh. Müller zu Hering führt.

Wir hatten neben Lotze vorhin Joh. Müller als denjenigen genannt, der auf die von Kant nicht berührte Frage, wodurch die spezielle räumliche Gestaltung unserer Wahrnehmungen sich bestimmt, eine Antwort zu geben versucht hat. Zwischen beiden besteht ein großer Unterschied insofern, als Lotze das hier vorliegende psychophysische Problem ganz direkt erfaßt und in Angriff genommen hat, während Joh. Müller eigentlich durch den Versuch, die Lehre Kants weiterzuführen und greifbarer auszugestalten, zu seinen Anschauungen gelangt ist. Aus der Lehre Kants war es vorzugsweise eines, was sich Joh. Müller aneignete und in physiologische Fragen übertrug, die Mitbestimmung der durch die Außenwelt horvorgerufenen Empfindungseindrücke durch die Natur des empfindenden Subjektes, die Subjektivität der Empfindungsqualitäten.

Offenbar hängt Müllers Lehre von den spezifischen Energien in gewisser Weise hiermit zusammen. Aber schon dieser Zusammenhang ist kein ganz einfacher. Denn es versteht sich, daß die subjektive Bestimmtheit der Empfindungsqualitäten keineswegs die spezifischen Energien im Müllerschen Sinne als unerläßliche Bedingung fordert. Andererseits jedoch ist klar, daß, wenn unsere Sinnesnerven in der von Müller angenommenen Weise spezifische Energien besitzen, die Art der Empfindung also von der Art des Reizes unabhängig ist, hiermit auch die Subjektivität der Empfindungsqualitäten in einer vorzugsweise einfachen und durchsichtigen Weise gegeben ist. Ganz ähnlich suchte nun Müller auch für die von Kant gelehrte Subjektivität der Raumvorstellung eine greifbare Unterlage und glaubte sie in den räumlichen Ver-

---

[1] Wer auf dem hier eingenommenen Standpunkt steht, wird es beklagen müssen, daß Helmholtz, während in bezug auf den hier als Hauptsache interessierenden Punkt, die empiristische Theorie der Lokalisation, ihm im wesentlichen beizupflichten ist, sich in bezug auf anderes, namentlich Kants Lehre von der Apriorität der Raumanschauung, aber auch in bezug auf das Verhältnis der verschiedenen Probleme untereinander, in einer gewissen Täuschung befunden hat. Er ist hierdurch in einen Gegensatz zu Kant gekommen, der einer empiristischen Theorie der Lokalisation nicht wesentlich ist. Er ist ferner hierdurch verhindert worden, den Gegensatz zwischen räumlichen Bestimmungen und sinnlichen Qualitäten in ganz erschöpfender Weise aufzufassen. Endlich aber ist hierdurch auch seine Lokalisationstheorie, durch Verkennung einer Grundlage, deren sie jedenfalls bedarf, in gewisser Weise verdunkelt worden, ein Umstand, der ohne Zweifel ihrer richtigen Würdigung vielfach hinderlich gewesen ist. Eben aus diesem Grunde ist es mir, wie eingangs erwähnt, wünschenswert erschienen, die Lokalisationslehre aus diesem Zusammenhange zu lösen und insbesondere auf ihre Vereinbarkeit mit der Lehre Kants mit besonderem Nachdruck hinzuweisen.

hältnissen des Subjektes selbst finden zu können. In unseren optischen Wahrnehmungen empfindet nach ihm die Netzhaut ihre eigene Ausdehnung. Es konnte zum mindesten scheinen, als ob auch für die subjektive Natur der Raumvorstellung hier eine besonders einfache Grundlage gegeben wäre, insbesondere wenn man daran dachte, daß etwa die Raumvorstellung verschiedener Subjekte je nach den räumlichen Bestimmungen der empfindenden Substanz eine verschiedene sein könnte. Auch hier ging also Müller über Kant insofern hinaus, als er nicht nur den Raum als die allgemeine und unveränderliche Form unserer sinnlichen Wahrnehmungen betrachtete, sondern dieses auf die objektiv gegebene räumliche Anordnung der unserem Seelenleben zugrunde liegenden Vorgänge zurückführen zu müssen glaubte, womit denn zugleich verknüpft war, daß auch im einzelnen die subjektive Ordnung als mit einer objektiv vorhandenen ohne weiteres gegeben betrachtet wurde. Hiermit erstreckte sich nun die Theorie Müllers auf den nämlichen Gegenstand, dem auch die Lotzesche gilt, die Verhältnisse des psychophysischen Zusammenhanges. Und, wie wir hinzufügen dürfen, sie beantwortet die sich hier bietende Frage genau im entgegengesetzten Sinne. Denn während für Lotze vor allem das feststand, daß die objektiv gegebenen räumlichen Anordnungen als Grundlage der subjektiven nicht genügen, läuft ja die Vorstellung Joh. Müllers darauf hinaus, diese als unmittelbares Ergebnis jener anzusehen.

Finden wir also bei Joh. Müller trotz seiner Anlehnung an Kant doch bestimmte Vorstellungen physiologischen oder psychophysischen Inhaltes, die Kant ganz fremd sind, so müssen wir ähnlich auch betonen, daß der spätere Nativismus Herings trotz wichtiger innerer Beziehungen zu der Müllerschen Lehre sich doch auch von dieser tiefgreifend unterscheidet, mit den Anschauungen Kants aber gar nichts mehr gemein hat. Der eigentliche Ausgangspunkt Herings, der Boden, auf dem seine Anschauungen erwachsen sind, und das Gebiet, auf das sie sich in erster Linie beziehen, sind wiederum die besonderen Tatsachen der Sinnesphysiologie; dies gilt für ihn ganz ähnlich wie für Helmholtz, und auf dieser Identität der von beiden ins Auge gefaßten Probleme beruht ja auch der fast diametrale Gegensatz ihrer Anschauungen und Ergebnisse. Den Ausgangspunkt der Heringschen Betrachtung bildet die unbestreitbare Tatsache, daß unserem optischen Empfinden die räumlichen Bestimmungen in derselben zwingenden und unmittelbaren Weise zukommen, wie ihre sonstigen Eigenschaften (Helligkeit und Farbe). Wenn Hering hierdurch veranlaßt wurde, auch für sie eine physiologisch definierbare Grundlage zu fordern, so folgte er hierin allerdings Joh. Müller, der ja auch in der räumlichen Ordnung des Wahrgenommenen etwas durch den physiologischen Prozeß und die anatomischen Gestaltungen unmittelbar Bestimmtes erblickte. Indessen hat Hering schon den Kernpunkt der Müllerschen Lehre, die Identifizierung der objektiven und subjektiven Ordnung ganz fallen lassen. Und noch weniger hat er die schon bei Joh. Müller zurücktretenden Hauptpunkte der Kantschen Anschauung sich zu eigen gemacht, die Einheitlichkeit und Unveränderlichkeit der Raumvorstellung. Zwingt uns diese, zwischen den räumlichen und zeitlichen Bestimmungen unserer Empfindungen auf der einen und den übrigen (qualitativen oder intensiven) auf der anderen Seite einen fundamentalen Unterschied anzuerkennen, so liegt das Charakteristische der Heringschen Anschauung gerade darin, diesen Unterschied zu verwischen, die räumlichen Bestimmungen jenen anderen ganz gleich zu stellen. In dem Nativismus

Herings lassen sich also irgendwelche Übereinstimmungen mit Kant gar nicht mehr nachweisen. Soweit er überhaupt Verhältnisse betrifft, die auch Gegenstand der Kantschen Lehre sind, nähert er sich vielmehr einer Auffassung, die derjenigen Kants direkt entgegengesetzt ist, und wie wir sie als eine sensualistische zu bezeichnen gewohnt sind.[1]

Als Hauptergebnis eines zusammenfassenden Überblickes muß also festgehalten werden, daß, wenn wir auch mit Recht gewohnt sind, die ganze Lehre vom räumlichen Wahrnehmen mit einer Reihe von Forschern in Verbindung zu bringen, und deren Lehren als aufeinanderfolgende Phasen einer fortschreitenden Entwickelung zu betrachten, es doch durchaus irrtümlich wäre, wenn wir in den von diesen Forschern entwickelten Theorien aufeinanderfolgende Versuche zur Lösung eines und desselben Problemes erblicken wollten. Vielmehr wird man vor allem im Auge behalten müssen, daß dem Fortgange der Zeit und dem individuellen Standpunkte entsprechend es ganz verschiedene Gegenstände waren, die ins Auge gefaßt und deren Aufklärung versucht wurde: die allgemeine psychologische Natur der Raumvorstellung und im Zusammenhange damit der logische Charakter der geometrischen Sätze, der psychophysische Zusammenhang, und endlich die besonderen Verhältnisse der räumlichen Wahrnehmung, die Gesetze der Lokalisation. Man sieht hieraus, wie irrtümlich es wäre, wenn man die Helmholtzschen Anschauungen schlechtweg als Verneinung der Kantschen betrachten wollte. Im Gegenteil: für einen gewissen und gerade für den uns hier interessierenden Teil der Helmholtzschen Lehre (die Lokalisationstheorie) bildet die Kantsche von der Einheitlichkeit und Unveränderlichkeit der Raumvorstellung zum mindesten diejenige Grundlage, auf die sie sich am einfachsten und verständlichsten aufbauen läßt. Und noch verkehrter wäre es, diejenigen Anschauungen, die Helmholtz unter dem Namen der nativistischen bestritten hat, mit dem Apriorismus Kants zu identifizieren. Im Gegenteil: der sensualistische Grundzug dieser Theorie steht mit der Apriorität Kants im direktesten Widerspruch.

Wenn ich mich nach diesem Überblick zu der Frage wende, wieweit sich, seit Helmholtz seine empiristische Theorie entwickelte, der Stand der Fragen geklärt oder durch neue Tatsachen verschoben hat, so darf hier zunächst mit einem Worte darauf hingewiesen werden, daß die von Helmholtz vertretene Anschauung in betreff der allgemeinen psychologischen Natur der Raumvorstellung und die damit zusammenhängenden logischen Fragen (die Punkte, in bezug auf die auch ich mich der Helmholtzschen Lehre nicht anzuschließen vermag) auch des weiteren im Laufe der Zeit überaus kontrovers geblieben sind, und daß in diesen Beziehungen auch weiterhin namentlich die Kantsche Auffassung zahlreiche und hervorragende Vertreter gefunden hat. Es mag hier genügen, die Namen von Liebmann, Windelband und Riehl zu nennen, und insbesondere auf des letztgenannten Autors Schriftchen (Hermann v. Helmholtz in seinem Verhältnis zu Kant, Berlin 1909) zu verweisen.

Ferner mag der Vollständigkeit wegen erwähnt werden, daß die Grundfragen des psychophysischen Zusammenhanges, eben jene, in bezug auf die wie

---

[1] Hiermit steht es im Einklange, daß Hering in der Vorrede seines ersten Beitrages (1861) Joh. Müller als denjenigen hervorhebt, dem er sich am engsten anschließt, daneben eine ganze Reihe von anderen Forschern (Helmholtz, Lotze, Volkmann, Panum, Brücke, Nagel) als solche nennt, die seiner Arbeit in dieser oder jener Hinsicht förderlich gewesen seien, Kant dagegen überhaupt nicht erwähnt.

erwähnt die Anschauungen von JOH. MÜLLER und LOTZE sich gegenüberstanden, auch gegenwärtig als durchaus offene betrachtet werden müssen. Zwar das unterliegt keinem Zweifel, daß wir uns die Empfindungen nicht mit MÜLLER an die Netzhautprozesse unmittelbar gebunden denken können, seine Annahmen also höchstens in einer analogen Form auf Vorgänge der Hirnrinde übertragen werden könnten. Auch ist, wie mehrfach erwähnt, die Ansicht wenn auch keineswegs unbestritten, doch wenigstens in naturwissenschaftlichen Kreisen eine ziemlich allgemein anerkannte, daß die Bewußtseinserscheinungen durchgängig und in detaillierter Weise in materiellen Vorgängen des Gehirns ihr Substrat finden. Welcher Art aber diese Vorgänge sein mögen, in welcher Weise wir uns speziell etwa die Substrate einer räumlich geordneten Wahrnehmung zu denken haben, dies sind Fragen, die vorderhand wohl jeder sicheren Entscheidung sich entziehen, jedenfalls keine allgemein anerkannte Beantwortung erfahren haben.

Was den Kernpunkt der HELMHOLTZschen Lehre, die Lokalisationsverhältnisse anlangt, so muß man wie ich glaube konstatieren, daß die Tatsachen, auf die wir gegenwärtig ihre Beurteilung stützen können, in der Hauptsache die nämlichen sind, die auch schon vor 40 Jahren bekannt waren und von HELMHOLTZ seiner Theorie zugrunde gelegt wurden. Es ist an positivem Tatsachenmaterial nichts bekannt geworden, was die Hauptpunkte dieser Theorie hätte erschüttern oder wesentlich modifizieren können. Vielmehr haben teils eine Anzahl spezieller Tatsachen, wie z. B. die Erfahrungen über das Sehen der Schielenden, teils auch gewisse Modifikationen allgemeiner Anschauungen die empiristische Theorie in beachtenswerter Weise bestätigt, bzw. sie auf eine breitere und sicherere Unterlage gestellt. So hat sich denn auch unsere obige Betrachtung, trotz der mehrfach betonten prinzipiellen Unterschiede in bezug auf die Psychologie der Raumvorstellung, doch in der Hauptsache, in betreff der Lokalisation, der HELMHOLTZschen Lehre wesentlich anschließen müssen. Auch sie führte dazu, der Erfahrung, dem Erlernen eine fundamentale Bedeutung für die Lokalisationsverhältnisse beizumessen, und es sind in der Hauptsache die schon von HELMHOLTZ dargelegten und in diesem Zusammenhange erörterten Tatsachen, auf Grund deren auch gegenwärtig diese erfahrungsmäßige Ausbildung der Lokalisation behauptet werden kann und muß.

Die Punkte, in bezug auf die wir auch hinsichtlich der Lokalisation von der HELMHOLTZschen Lehre abzuweichen, oder richtiger gesagt, über sie hinauszugehen veranlaßt waren, sind denn auch, wie großen Wert man auch auf sie legen mag, doch nur von sekundärer Bedeutung. Sie bestehen darin, daß wir erstens den bildungsgesetzlichen Grundlagen der Lokalisation (insbesondere durch die Vermutung solcher auch für die Beziehungen der beiden Augen) eine größere Bedeutung zubilligen müssen, sodann darin, daß wir die Vorgänge des Erlernens unter dem Gesichtspunkte einer physiologischen Ausbildung betrachten, woraus sich denn gewisse Modifikationen teils für diese Vorgänge selbst, teils auch in bezug auf die für sie zu fordernden Grundlagen ergaben. Um die Bedeutung dieser Modifikationen richtig zu würdigen, wird man beachten müssen, daß HELMHOLTZ, so entschieden er von der grundlegenden Bedeutung des Erlernens für die Lokalisation überzeugt war, doch sicher der letzte gewesen wäre zu behaupten, daß es zur Zeit möglich, oder daß es ihm gelungen wäre, von der Art der mit diesem Namen bezeichneten Vorgänge, oder von den bildungsgesetzlich gegebenen Einrichtungen, an die das Erlernen anzuknüpfen

hat, ein erschöpfendes und überall zutreffendes Bild zu geben. Vielmehr muß hier zunächst daran erinnert werden, daß Helmholtz, wie er zu vielen Malen betont hat, aus methodologischen Gründen in erster Linie ein als richtig und unentbehrlich erkanntes Prinzip der Deutung der Tatsachen zugrunde zu legen wünschte, um sozusagen zu prüfen, wieweit man mit ihm kommen kann. Werden hierdurch andere Möglichkeiten in der Darstellung an die zweite Stelle gerückt, so hatte dies doch nicht die Bedeutung, daß sie schlechthin abgelehnt oder bestritten werden sollten, sondern lediglich die, daß er sie als einem anderen zurzeit sehr unsicheren Gebiet angehörig betrachtete, und daher ihnen gegenüber eine besonders vorsichtige Zurückhaltung für geboten hielt. So wäre es namentlich eine vollständige Verkennung der Helmholtzschen Ansichten, wenn man meinen wollte (wie dies gelegentlich gesagt worden ist), er habe die Mitwirkung bildungsgesetzlicher Verhältnisse für die Lokalisation völlig in Abrede stellen wollen. Er hat vielmehr eine solche in dem Sinne, in dem auch wir sie oben für wahrscheinlich anerkannt haben, nämlich für den Zusammenhang zwischen Sehrichtung und Netzhautort, als eine zwar nicht streng nachweisbare, aber auch von seinem Standpunkt aus durchaus wahrscheinliche Annahme bezeichnet. Wenn neuere Untersuchungen über das Sehen der Schielenden Anlaß bieten, derartige Annahmen noch weiter auszudehnen, so liegt darin keine Änderung, der wir eine grundsätzliche Bedeutung beimessen könnten.

Es muß dies hier um so entschiedener hervorgehoben werden, als in einem Teil der oben erwähnten Arbeiten die Ansicht ausgesprochen worden ist, daß durch diese Erfahrungen die empiristische Theorie erschüttert oder als unrichtig erwiesen worden sei. Man kann das, wie mir scheint, nicht tun, ohne in einer mehr als willkürlichen Weise die Nebensache zur Hauptsache zu machen. Wenn die neueren Beobachtungen zeigen, daß die sekundäre Korrespondenz hinsichtlich ihrer Präzision und ihrer Leistungen hinter der primären zurückbleibt, und hierdurch eine bildungsgesetzliche Begünstigung dieser letzteren wahrscheinlich machen, so schließt sich diese Vorstellung der von Helmholtz selbst in bezug auf die Richtungsanordnung innerhalb des Gesichtsfeldes befürworteten als eine ganz gleichartige an. Hätten die jetzt bekannten Tatsachen vor 40 Jahren schon vorgelegen, so hätte Helmholtz aus ihnen wohl eine engere Beziehung zwischen den Lokalzeichen korrespondierender Punktpaare gefolgert, eine Annahme, die er damals als überflüssig bezeichnete.

Vor allem aber wird man doch im Auge behalten müssen, daß die neueren Untersuchungen in großem Umfange und in ganz entscheidender Weise das bestätigt haben, was Helmholtz damals auf Grund eines noch geringen Materials geschlossen hatte, und daß damit auch die von ihm hieran geknüpften Schlußfolgerungen sich in den Hauptpunkten als durchaus zutreffend herausgestellt haben. Dies ist die Änderung in der Beziehung der Sehrichtungen (die anomale Sehrichtungsgemeinschaft nach der Bezeichnung Tschermaks). Gerade diese Tatsache, wie wir oben betonten, lehrt in besonders beachtenswerter Weise, wie das, was wir Sehrichtung nennen, nichts mit dem Netzhautort fest Gegebenes ist, sondern sich in verwickelter und eben darum auch abzuändernder Weise, insbesondere unter Mitwirkung des Stellungsfaktors ergibt. Eine unbefangene Erwägung wird also meines Erachtens nie zu einem anderen Schlusse kommen können, als daß die Tatsachen, indem sie die tiefgreifenden Änderungen der Sehweise bei Schielstellungen, insbesondere die Entwickelung einer anomalen Sehrichtungsbeziehung kennen lehren, den Grundvorstellungen einer empiristischen Anschauung in beachtenswerter Weise, wenn vielleicht nicht ganz in dem Umfange wie Helmholtz dies annahm, doch jedenfalls in den wichtigsten und entscheidendsten Punkten zur Stütze dienen. Und es heißt meines Erachtens den Zusammenhang der

Dinge geradezu auf den Kopf stellen, wenn man die Erfahrungen über das Sehen der Schielenden als eine Bestätigung nativistischer Anschauungen behandelt. Sie sind jedenfalls das Gegenteil dessen, was auf Grund nativistischer Vorstellungen erwartet werden mußte.

Ähnliches gilt wohl auch für die physiologische bzw. psychologische Auffassung des Erlernens. Man muß bedenken, daß der ganze Vorgang, dessen Bedeutung für die räumlichen Wahrnehmungen HELMHOLTZ zum ersten Male darzulegen unternahm, damals nur auf psychologischem Gebiete als bekannt und geläufig gelten konnte. Auf diese Verhältnisse Bezug zu nehmen und sie auch hinsichtlich der Terminologie zugrunde zu legen, war daher unumgänglich. Daß alles Einüben und Erlernen in letzter Instanz als ein physiologisches aufgefaßt und auf die Ausbildung zerebraler Einrichtungen bezogen werden müsse, das hat HELMHOLTZ zwar niemals ausdrücklich hervorgehoben, aber auch niemals bestritten.

Wenn HELMHOLTZ, wie er allerdings sehr vielfach getan hat, die psychischen Vorgänge den physiologischen gegenüberstellte, so folgte er dabei zunächst nur dem Prinzip, die letzteren nach gewissen unmittelbar aufweisbaren und ihnen sicher zukommenden, nicht aber nach hypothetischen Merkmalen zu bezeichnen. Und dies wird man immer im Auge behalten müssen, um die Bedeutung richtig zu verstehen, in der HELMHOLTZ auch eine Reihe speziellerer Ausdrücke von psychologischer Natur benutzte. So hat er auch mit der vielgenannten Bezeichnung der unbewußten Schlüsse in erster Linie die hier vorliegenden Verhältnisse einer Reihe anderer wohlbekannter als gleichartig zuordnen wollen, während er schwerlich der Ansicht war, mit dieser Benennung die Natur der hier gemeinten Vorgänge in endgültiger Weise angegeben zu haben. Daß es sich hierbei um eine im Grunde figürliche Bezeichnung gewisser physiologischer Verhältnisse handle, würde er schwerlich bestritten, aber wohl als eine zurzeit jeder Prüfung sich entziehende Hypothese bezeichnet haben, deren Verfolgung vorderhand wertlos und unersprießlich sei.[1]

Das, worauf es HELMHOLTZ hier eigentlich ankam, müssen wir daher in etwas ganz anderem finden. Er wollte diejenigen Vorgänge, die er als psychologische in Anspruch nahm und im einzelnen in psychologischer Terminologie bezeichnete, bestimmten Gruppen bekannter physiologischer Vorgänge und Zusammenhänge als etwas Andersartiges gegenüberstellen. Eine solche Gegenüberstellung aber erscheint auch von dem Standpunkt aus, der gegenwärtig wohl überwiegend vertreten wird, und von dem auch hier ausgegangen wurde, nicht minder berechtigt als damals. Denn es handelt sich eben hier um eine besondere Art physiologischer Vorgänge, die durch eine Anzahl wichtiger und merkwürdiger Eigentümlichkeiten, vor allem durch die ihnen zukommende Wandelbarkeit und Ausbildungsfähigkeit ausgezeichnet sind.

Nach alledem ist mir eine physiologische Auffassung des Erlernens, der ich wohl in Übereinstimmung mit zahlreichen Fachgenossen) zuneige, niemals

[1] Daß HELMHOLTZ eine physiologische Grundlage der hier in Frage kommenden seelischen Funktionen keineswegs bestreiten wollte, lassen manche Stellen in recht interessanter Weise erkennen. So sagt er (S. 440) „Will man diese Vorgänge der Assoziation und des natürlichen Flusses der Vorstellungen nicht zu den Seelentätigkeiten rechnen, sondern der Nervensubstanz zuschreiben, so will ich um den Namen nicht streiten.“ Ähnlich auch S. 408, wo die physiologische Natur gewisser Einrichtungen mit einem entsprechenden Vorbehalt bestritten wird. (Sie beruhen „nicht auf einer organischen Einrichtung des Nervensystems, wenigstens auf keiner anderen als die unseren Seelentätigkeiten zugrunde liegt.“)

als eine tiefgreifende oder grundsätzliche Abweichung von den HELMHOLTZschen Ansichten erschienen. Wohl dagegen darf man behaupten, daß die empiristische Theorie der Lokalisation durch diese Auffassung an Wahrscheinlichkeit gewinnt und von manchen Schwierigkeiten befreit wird. Denn wie oben schon dargelegt, erscheint die erfahrungsmäßige Ausbildung der Lokalisation so betrachtet als ein Vorgang, dem sich zahlreiche andere an die Seite stellen lassen, und für den ein tiefergehendes Verständnis durch unsere Vorstellungen über die Bildsamkeit und Wandelbarkeit zerebraler Zusammenhänge mindestens angebahnt ist.

Im Anschluß hieran möchte ich mit einem Worte darauf hinweisen, wie gänzlich unzutreffend die zuweilen gehörte Ansicht ist, daß die HELMHOLTZschen Anschauungen, als psychologische der weiteren Forschung einen Riegel vorgeschoben hätten, und daß die entgegengesetzten, indem sie die räumlichen Wahrnehmungen auf eine physiologische Grundlage gestellt, sie sozusagen erst zu einem Gegenstande exakter Forschung gemacht hätten. Niemand kann doch im Ernst glauben, daß die psychologischen Vorgänge überhaupt oder auch speziell diejenigen, von denen hier die Rede ist, ein jeder Gesetzmäßigkeit entzogenes Chaos darstellten, und daß demgemäß die psychologische Deutung den Verzicht auf ein Verständnis oder auf ihre Unterordnung unter angebbare Regeln bedeute. Tatsächlich kommt es in erster Linie darauf an, klar zu legen, daß die Verhältnisse der Lokalisation eine Ausbildung und Entwickelung besitzen, demgemäß auch mannigfaltigen Abänderungen zugänglich sind, und daß hiermit ein gewisses Gebiet bezeichnet ist, dessen genauere Erforschung wir uns zur Aufgabe stellen müssen. Ob diese Aufgabe in psychologischer oder in physiologischer Weise zu lösen ist, darf dabei zunächst dahingestellt bleiben, und ob wir die gestellte Aufgabe in Ausdrücken der einen oder anderen Art bezeichnen, ist dabei ganz gleichgültig. Faßte im Gegensatz dazu eine nativistische Theorie die räumlichen Bestimmungen als Empfindungen auf, die gleich den anderen in einer festen Weise an die physiologische Affizierung des Sinnesorganes geknüpft seien, so ward von ihr jenes ganze Gebiet bestritten und in gewisser Weise verkannt. Sie ist es also, wenn man überhaupt in dieser Weise gegenüberstellen will, die der Forschung einen Riegel vorzuschieben geeignet ist, während die empiristische durch den Einblick, den sie uns in ein gewisses Tatsachengebiet eröffnet, der Forschung neue Aufgaben gestellt und neue Bahnen eröffnet hat. Damit stimmt denn auch überein, daß es in Wirklichkeit nicht die nativistischen, sondern die empiristischen Anschauungen waren, die z. B. in die Untersuchung der Schielenden zuerst eine neue und fruchtbare Anregung brachten.

Auf der anderen Seite aber müssen wir auch das, was HELMHOLTZ an den nativistischen Auffassungen seiner Gegner bestritt, auch gegenwärtig als unrichtig und unhaltbar bezeichnen. Denn der von HELMHOLTZ bekämpfte Nativismus gipfelte ja darin, den Seheindrücken bestimmte Ortswerte zuzuschreiben, die ihnen ganz ähnlich wie die sonstigen Beschaffenheiten der Empfindung zufolge angeborener Einrichtungen zukommen sollten.[1] Und diese

[1] Allerdings ist auch von nativistischer Seite der Unterschied der dem primitiven und dem ausgebildeten Sehen eigenen räumlichen Bestimmungen öfters hervorgehoben worden. (S. z. B. HERING in HERMANNS Handbuch III. S. 565.) Allein es ist ja klar, daß, wenn wir eine Entwickelung der dem ausgebildeten Sehen zukommenden räumlichen Bestimmungen aus gänzlich andersartigen annehmen, wir uns von einer völlig empiristischen Auffassung nur noch dem Namen nach unterscheiden würden. Äußerungen, wie die angeführte zeigen also nur, daß auch von denjenigen, die die räumlichen Wahrnehmungen in nativistischem Sinne auffassen wollten, an eine ganz radikale Durchführung dieses

ganze Vorstellung kann meines Erachtens auch gegenwärtig nur als eine durchaus unzutreffende abgelehnt werden. Selbst da, wo sie am ehesten diskutierbar erscheinen könnte, bei der Richtungslokalisation, trägt sie der eigentümlichen Bedeutung, die gerade die Sehrichtung durch ihre Beziehung auf den Körper des Sehenden besitzt, nicht Rechnung. Indem die primitiven Höhen- und Breitenwerte als Bestimmungen auch des ausgebildeten Sehens betrachtet werden, ergänzt nur durch eine Einfügung der Vorstellung des eigenen Körpers, ist die hier stattfindende Entwickelung, wenn auch nicht direkt bestritten, doch in einer viel zu engen und schematischen Weise aufgefaßt. Hiermit hängt zusammen, daß diese Anschauung von den bei abnormen Augenstellungen zu beobachtenden Erscheinungen (Verdoppelung des Stellungsfaktors, Ausbildung veränderter Sehrichtungsbeziehungen keine Rechenschaft zu geben vermag. Auch erscheint die hiermit angenommene quantitative Festlegung zum mindesten wenig wahrscheinlich und durch nichts bewiesen, vielmehr eine empirische Ausbildung der Augenmaßverhältnisse weit wahrscheinlicher.

In noch viel entscheidenderer Weise zeigt sich die entsprechende Vorstellung mit Bezug auf die Tiefeneindrücke undurchführbar, selbst in dem Falle, wo überhaupt an eine bestimmte physiologische Grundlage dieser Eindrücke gedacht werden kann, bei der binokularen Tiefenwahrnehmung, da also, wo durch eine Kombination eines rechts- und eines linksäugigen Eindruckes von bestimmter Querdisparation der Eindruck einer Entfernungsanordnung erzeugt wird. Denn wie können wir uns den hier entstehenden Eindruck als Ergebnis eines dem rechten und dem linken zukommenden Tiefenwertes denken, wenn die gleiche Querdisparation je nach Umständen den Eindruck eines Tiefenabstandes von völlig verschiedenem Betrage hervorbringt, wenn dieser Betrag sich nach der Entfernung richtet, in der der Fixationspunkt gesehen wird, die nun ihrerseits wieder von den mannigfaltigsten empirischen Momenten abhängt? Auch in diesem Falle also erscheint die algebraische Zusammenaddierung der der einen und anderen Empfindung zukommenden Tiefenwerte als eine den Tatsachen durchaus widersprechende Schematisierung. Vollends unzutreffend erscheint eine solche Darstellung im Hinblick auf die komplizierten Verhältnisse, von denen die die Entstehung von Tiefeneindrücken bedingenden Kombinationen rechts- und linksäugiger Eindrücke abhängen, und noch mehr vielleicht im Hinblick auf die Erscheinungen eines einäugigen Sehens, welches die supponierten Tiefenwerte eben tatsächlich nicht zeigt. Werden also den Sehempfindungen Tiefenwerte als ähnlich feste Bestimmungen wie die anderen optischen Qualitäten zugeschrieben (mit der Hinzufügung, daß bei binokularer Verschmelzung der resultierende Tiefeneindruck durch algebraische Zusammenaddierung der einzelnen sich bilden soll), so ist nicht darüber hinwegzukommen, daß dies schon als Beschreibung des direkt Beobachtbaren durchaus unzutreffend ist. Der Entfernungseindruck ist allerdings durch die Unmittelbarkeit, mit der er in der Regel zum Bewußtsein kommt, den sonstigen Bestimmungen der Empfindung gleich; aber er ist von überaus komplizierten und zweifellos in hohem Grade von der Erfahrung abhängigen und modifizierbaren Bedingungen bestimmt. Und wir werden auch gegenwärtig Helmholtz nur vollkommen

Prinzipes nicht gedacht werden konnte. Dies ändert nichts daran, daß dieses Prinzip doch das war, die räumlichen Bestimmungen auch des ausgebildeten Sehens mit angeborenen Raumwerten in einen möglichst engen Zusammenhang zu bringen, und daß dieses Prinzip im einzelnen auch in weitem Umfange zur Anwendung gelangt ist.

beipflichten können, wenn er sagte, daß solche Tiefenwerte, da sie unter keinen Umständen wirklich aufweisbar sind, etwas völlig Fiktives bedeuten, und daß ihr Vorhandensein, da sie fortwährend von der Erfahrung korrigiert und überwunden werden müßten, auch durchaus zweckwidrig sein würde.[1]

Wir dürfen aber wohl noch einen Schritt weiter gehen und behaupten, daß Helmholtz gerade mit seiner Bestreitung desjenigen Prinzipes, das die eigentliche Basis der nativistischen Auffassung ausmachte, in vollem Rechte war. Den Ausgangspunkt der nativistischen Argumentation bildete ja stets die Tatsache, daß unseren optischen Eindrücken die räumlichen Bestimmungen in ganz derselben zwangsmäßigen und unmittelbaren Art zukommen, wie die sonstigen Qualitäten (Farbe und Helligkeit). Hierüber bestand kein Zweifel; die Frage war nur, ob daraus auf eine tiefere Übereinstimmung in bezug auf Entstehung und physiologische Begründung geschlossen werden darf. Dies war es, was Helmholtz verneinte. Er zeigte, daß gewisse Eindrücke sehr wohl mit voller Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit gegeben sein, und hierin den Empfindungen völlig gleichstehen, trotzdem aber auf sehr verwickelten und erfahrungsgemäß ausgebildeten Bedingungen beruhen können.

Und dies können wir auf Grund des gegenwärtig Bekannten nur in vollem Maße bestätigen. Ausbildungen, durch die sich Zusammenhänge dieser Art entwickeln, kommen ohne Zweifel sehr vielfach vor. Das Bestehen jener Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit ist daher für die psychologische Natur oder für den Entstehungsmodus irgendwelcher psychischer Erscheinungen kein brauchbares Kriterium.

Auch darüber also ist meines Erachtens nicht hinweg zu kommen, daß der Nativismus, indem er im Hinblick auf jene Unmittelbarkeit und Zwangsmäßigkeit die räumlichen Bestimmungen den Empfindungsqualitäten ganz gleichstellen zu müssen glaubte, die Bedeutung dieser Eigentümlichkeit in verhängnisvoller Weise überschätzt hat. Nur wenn wir unsere Aufmerksamkeit ausschließlich auf die Art beschränken, wie eine derartige Bestimmung ins Bewußtsein tritt, erscheint jene Gleichstellung berechtigt. Für die psychologische Natur und die allgemeineren Entstehungsbedingungen ist jenes Kriterium belanglos. Und indem der Nativismus versuchte, auch auf diesen Gebieten eine Parallelisierung der räumlichen Bestimmungen mit den Empfindungsqualitäten durchzuführen, ist er zu unhaltbaren Konsequenzen, zu einer Verkennung jenes ganzen, gerade den räumlichen Bestimmungen eigentümlichen Tatsachengebietes geführt worden, in dessen Erkennung und richtiger Würdigung wir das Verdienst der empiristischen Anschauung erblicken müssen.[2]

[1] Nicht minder widerspruchsvoll erscheint es mir, wenn Hering selbst auf die Erscheinungsweise durchsichtiger Gegenstände hinweist, bei der wir den Raum in einer gewissen Tiefenerstreckung angefüllt, also (in einer Richtung) nicht nur in bestimmter Tiefe, sondern in einer ganzen Tiefenerstreckung etwas sehen. Denn es ist ja klar, daß eine Empfindung dieser Art aus irgendwelchen, jedem Netzhautpunkt zukommenden Tiefenwerten gar nicht mehr hergeleitet werden kann, sondern für sie ein ganz andersartiges Zustandekommen angenommen werden muß. Je mehr wir also (mit Hering) die Gleichartigkeit eines solchen Sehens mit den gewöhnlichen Tiefeneindrücken betonen, um so berechtigter und unbedenklicher wird es erscheinen, auch für diese ein verwickeltes Entstehen, nicht eine Begründung durch festgegebene „Tiefenwerte“ anzunehmen.

[2] Außer Betracht lasse ich, da uns hier nur die Frage der Lokalisation interessiert, den meines Erachtens schwersten prinzipiellen Fehler des hier in Rede stehenden Nativismus. Dieser liegt, wie oben bereits angedeutet, in seiner sensualistischen Natur, d. h. darin,

Hiermit ist vereinbar, wie an dieser Stelle nochmals zu betonen angemessen sein wird, daß bildungsgesetzliche Grundlagen für die räumlichen Wahrnehmungen als unerläßliche Bedingung anerkannt, daß solche auch in gewissen Beziehungen, in denen HELMHOLTZ sie für unwahrscheinlich hielt, vermutet werden müssen, und daß sich insofern auch die von nativistischer Seite vertretenen Annahmen zu einem gewissen Teile direkt bestätigt, zu einem anderen mindestens als berechtigte Vermutungen herausgestellt haben. Nur wird man allerdings sagen müssen, daß der Nativismus, indem er diese bildungsgesetzlichen Grundlagen in den den einzelnen Netzhautpunkten fest zugeordneten Ortswerten finden zu können meinte, schwerlich zu einer zutreffenden und sicher zu keiner erschöpfenden oder genügenden Darstellung derselben gelangt ist. Schon für die Punkte einer Netzhaut ist es, wie wir sahen, kaum berechtigt, jedem einen festbestimmten Richtungs- Höhen- und Breiten)wert zuzuschreiben. Noch weniger wird die Beziehung beider Augen ausreichend ausgedrückt sein, wenn wir bestimmten Punktpaaren die gleichen Richtungs- und entgegengesetzten Tiefenwerte zuschreiben. Denn abgesehen davon, daß die erstere Beziehung keine ganz festgelegte und die zweite überhaupt gänzlich fiktiv ist, muß man sagen, daß die eigenartigen Momente, in denen sich ein Unterschied der rechts- und linksäugigen Eindrücke und ein innerer Zusammenhang der demselben Auge angehörigen ausdrückt, hierbei nicht zur Geltung kommen; so die des Wettstreites, die Möglichkeit einer regionären Gestaltung desselben, die unter besonderen Bedingungen mögliche direkte Unterscheidung des Rechts- und Linksäugigen. Hier führt uns eben die unbefangene Betrachtung dazu, das Wesen jener Beziehungen in anatomischen, vorläufig nicht genauer angebbaren Verhältnissen zu suchen.

Wie sich im obigen herausgestellt hat und soeben nochmals ausgeführt wurde, gestattet eine empiristische Auffassung der Lokalisation eine sehr viel stärkere Betonung bildungsgesetzlicher Grundlagen, als wir sie bei HELMHOLTZ finden. Man kann hieran die Frage knüpfen, ob die Auffassung, zu der wir hier schließlich gelangten, nicht mit gleichem Rechte auch eine nativistische genannt werden könne, nicht zwar im Sinne früherer Vertreter nativistischer Theorien, aber in einem erweiterten, wiederum der Erfahrung eine größere Bedeutung einräumenden Sinne. In gewisser Weise darf dies wohl bejaht werden. Schon oben wurde bemerkt, und die spezielle Betrachtung hat dies noch deutlicher hervortreten lassen, daß es verkehrt wäre, Nativismus und Empirismus als zwei

daß er die Raumvorstellung als Aggregat einer beschränkten Zahl einzelner mit den Sehempfindungen verknüpfter Ortsempfindungen auffaßt.

Auch darauf mag hier, ohne des genaueren darauf einzugehen, nur mit einem Worte hingewiesen werden, daß dem Nativismus durchweg eine allgemeine Tendenz innewohnte, die Lokalisationserscheinungen als in einer einfachen Weise fest geregelt anzusehen, und daß er hierdurch auch im einzelnen mehr als einmal irregeführt worden ist. So hat sich die Annahme, daß die auf den Netzhauthorizonten abgebildeten Linien immer horizontal erscheinen, nicht bestätigt, ebensowenig die, daß die auf den beiden scheinbar vertikalen Meridianen abgebildeten (und demgemäß einfach gesehenen) auf der Visierebene senkrecht zu stehen scheinen, ebensowenig die, daß die im Längshoropter liegenden Gegenstände in einer durch den Fixationspunkt gelegten und zur Sehrichtung normalen Ebene wahrgenommen werden. Überall haben sich die Erscheinungen als verwickelter und modifizierbarer herausgestellt, als zunächst angenommen worden war. Doch handelt es sich hier um Annahmen, die, wenn auch ersichtlich mit der allgemeinen Tendenz des Nativismus zusammenhängend, doch nicht von prinzipieller Bedeutung sind und daher leicht fallen gelassen werden können.

Anschauungen gegenüberzustellen, zwischen denen wir mit einem Entweder-Oder zu wählen hätten. Darüber besteht kein Zweifel und keine Meinungsverschiedenheit, daß (ganz allgemein gesprochen) sowohl bildungsgesetzlich bestimmte Verhältnisse wie die Erfahrung, also sowohl die von nativistischer wie die von empiristischer Seite in den Vordergrund gestellten Momente an unseren räumlichen Wahrnehmungen einen Anteil haben. Und wenn irgendwo, so wird es hier gelten, daß von den ursprünglich sich widerstreitenden Ansichten jeder ein gewisses Maß von Berechtigung zukommt. Je nach der größeren oder geringeren Bedeutung, die den einen und anderen Momenten beigemessen wird, erscheint eine fast stetige Abstufung der Anschauungen möglich; ob überhaupt und wo hier eine Grenze gezogen werden soll, wird immer eine Sache subjektiven Ermessens und kaum diskutierbar sein. Ein gewisses Maß von Subjektivität wird demgemäß auch derjenigen Betrachtung zukommen, die mir allerdings als die naturgemäße und maßgebendste erscheint, und die hier zu erwähnen ich um so weniger unterlassen darf, als sie (zwar für die Beurteilung der einzelnen Fragen ohne großen Belang, doch aber für den ganzen Tenor der obigen Darstellung bestimmend gewesen ist. Als die eigentlich kardinale Frage wird man, wie mir scheint, doch immer die bezeichnen müssen, ob die räumlichen Bestimmungen unserer Sinneseindrücke ihren übrigen (qualitativen und intensiven) als etwas grundsätzlich anderes gegenübergestellt werden, verschieden teils in bezug auf ihre psychologische Natur, ihren inneren Zusammenhang usw., teils in bezug auf ihre Entstehung, die Beschaffenheit des sie erzeugenden Mechanismus und insbesondere ihre Abhängigkeit von der Erfahrung. Die Bejahung dieser Frage, die Statuierung eines solchen prinzipiellen Unterschiedes, nicht aber die Bestreitung aller oder irgendwelcher besonderer bildungsgesetzlicher Grundlagen dürfen wir, wie mir scheint, als Kriterium einer empiristischen Auffassung in Anspruch nehmen. Auch für Helmholtz war dies ohne Zweifel der springende Punkt. Wiederholt und mit besonderem Nachdruck hat er betont, daß wir all das, was einer erfahrungsmäßigen Ausbildung und Abänderung unterliegt, nicht der Empfindung zurechnen dürfen. Und im Gegensatze hierzu ist von nativistischer Seite immer auf die Gleichartigkeit der räumlichen mit den anderen Bestimmungen besonderer Wert gelegt worden, wie dies schon in der Nomenklatur in gewisser Weise zum Ausdruck kommt. Auch auf dem Boden derjenigen Anschauung aber, zu der wir hier schließlich gelangten, besteht darüber kein Zweifel, daß die Betonung jenes Gegensatzes in höchstem Maße berechtigt ist, ja daß sie den eigentlich fruchtbaren, das ganze Gebiet erschließenden Gedanken darstellt. Denn sicherlich sind die ganzen Verhältnisse der Lokalisation von einer Art, für die wir wohl in der Verknüpfung unserer Empfindungen (im strengen Sinne des Wortes) mit empirischen Begriffen, nirgends aber in den sie selbst bestimmenden Bedingungen Analogien finden. Sind uns daher auch die physiologischen Vorgänge, um die es sich in dem einen und anderen dieser verschiedenen Fälle handelt, vorderhand nicht bekannt, so können wir doch nicht zweifeln, daß sich in jener Zusammen- und Gegenüberstellung ein durchaus zutreffender Einblick in ihre verschiedenen Formen und Modalitäten ausdrückt, während die Zusammenwerfung aller unter den einheitlichen Begriff der Empfindung nur geeignet ist, die Aufmerksamkeit von den wichtigen unterscheidenden Eigentümlichkeiten abzulenken.

Von diesem Gesichtspunkte ausgehend, möchte ich die im obigen vertretene

Anschauung, trotz dessen, was sie in bezug auf bildungsgesetzliche Grundlagen als wahrscheinlich anerkennt, doch ihrem Grundcharakter nach eine empiristische nennen. Wer dieser Betrachtung folgt, wird auch anerkennen, daß der HELMHOLTZsche Empirismus, wenn er auch manche Modifikationen und Ergänzungen fordert, uns doch den leitenden Gedanken gegeben hat, der auch gegenwärtig das Hauptstück unserer Einsicht in diese Probleme und die Grundlage der weiteren Forschung bildet.

II. Zur Theorie der binokularen Instrumente.

Bei der großen Bedeutung, die in neuerer Zeit die binokularen optischen Instrumente[1] gewonnen haben, erscheint es wünschenswert, einige vornehmlich wichtige Punkte aus der Theorie derselben hier im Zusammenhang zu erörtern. Allerdings sind im HELMHOLTZschen Text die hier in Betracht kommenden Verhältnisse sämtlich berührt, doch an verschiedenen Stellen, so daß schon eine etwas übersichtlichere Zusammenfassung nicht ohne Nutzen sein wird. Außerdem ist die HELMHOLTZsche Darstellung in gewisser Hinsicht mit Recht als nicht ganz zutreffend beanstandet worden, so daß hier eine Berichtigung geboten ist. Bei einer Reihe von Darstellungen andererseits, die wesentlich vom physikalischen Gesichtspunkt ausgehen und in dieser Hinsicht einwandsfrei und erschöpfend sind (wie namentlich die von CZAPSKI und v. ROHR[2]), kommen meines Erachtens die physiologischen Verhältnisse nicht ganz in der Weise zur Geltung, wie es für die uns hier obliegende Aufgabe zu wünschen ist.

Es ist ohne weiteres klar, daß die Konstruktion der binokularen optischen Instrumente hinsichtlich der Sehertolge ein außerordentlich weites Feld hat. Denn, wenn die dem rechten und linken Auge darzubietenden Bilder unabhängig erzeugt werden, so können die geometrischen Beziehungen dieser Bilder und damit auch der Eindruck, den sie dem Beschauer hervorrufen, in der mannigfachsten Weise gestaltet werden; so gelingt es leicht Anordnungen herzustellen, die die Gegenstände in frappierenden Entstellungen erscheinen lassen. Andererseits erwächst der Konstruktion der für den praktischen Gebrauch bestimmten Instrumente im allgemeinen die Aufgabe, Täuschungen und Entstellungen möglichst zu vermeiden. Es wird für das Folgende von Nutzen sein, wenn wir sogleich die Frage aufwerfen, was wir eigentlich von den optischen Instrumenten verlangen können, und hierdurch gewisse leitende Gesichtspunkte zu gewinnen suchen. Wir können hier an erster Stelle die Schaffung eines möglichst gleichartigen Ersatzes der realen Gegenstände erwähnen, eine Aufgabe, die naturgemäß nur für die Methoden der indirekten Betrachtung (stereoskopische Photographien) in Frage kommt. Eine vollständige Kongruenz mit den realen Gegenständen

[1] Den binokularen Instrumenten, die zur direkten Betrachtung irgendwelcher Gegenstände dienen, sind (wegen der vollkommenen Analogie der Probleme) die Einrichtungen zuzurechnen, bei denen Abbildungen (insbesondere photographische) der Gegenstände hergestellt und zur binokularen Betrachtung dargeboten werden, wie dies bei den Stereoskopen der Fall ist; wir sprechen in diesem Falle von einer indirekten Betrachtung.

[2] CZAPSKI, Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach ABBÉ. 2. Aufl. unter Mitwirkung des Verf. und mit Beiträgen von M. v. ROHR, herausgegeben von O. EPPENSTEIN. Leipzig 1904. Sonderabdruck aus WINKELMANNS Handbuch der Physik.

selbst kann hier erstrebt werden. An zweiter Stelle kann die Ersetzung eines Gegenstandes durch ein ihm geometrisch ähnliches Modell in Frage kommen. Die Substituierung eines vergrößerten Modells kann (beim Mikroskop) unmittelbar selbst als Zweck erscheinen. Aber auch in anderen Fällen kann die Darbietung eines Modells, namentlich auch eines verkleinerten, als eine zulässige und brauchbare Art angesehen werden, uns von dem Gegenstand eine richtige Vorstellung zu verschaffen. Endlich kann als ein drittes ein optischer Erfolg ins Auge gefaßt werden, der einem Ortswechsel des Beobachters, z. B. einer Annäherung an die betrachteten Gegenstände gleichkommt, ein Erfolg, wie wir ihn z. B. von den Fernröhren zu erwarten gewohnt sind. Wir können demzufolge den Weg einschlagen, daß wir prüfen, in welcher Weise das Aussehen eines Gegenstandes einerseits durch Änderungen der Entfernung und durch Größenvariierung, andererseits durch die verschiedenen in den optischen Instrumenten vereinigten und bis zu einem gewissen Grade frei kombinierbaren Einrichtungen modifiziert wird. Dabei wird sich dann ergeben, ob überhaupt und auf welche Weise es möglich ist, durch die optischen Einrichtungen etwas zu erreichen, was mit einer Änderung der Entfernung und Größe im Erfolg übereinstimmt.

Die hiermit gewonnene Anschauung von der den binokularen Instrumenten zu stellenden Aufgabe und von dem bei der Untersuchung einzuschlagenden Wege kompliziert sich nun aber durch einen hier sogleich zu erwähnenden Umstand. Betrachten wir irgendwelche Gegenstände unter Benutzung eines binokularen optischen Instrumentes, so kann immer zunächst die Frage aufgeworfen werden — deren Beantwortung eine rein physikalisch-geometrische Aufgabe ist —, welche Beschaffenheit und Anordnung reale Objekte besitzen müßten, damit sie bei der Betrachtung mit freiem Auge die gleichen optischen Erfolge, d. h. bei gleichen Augenstellungen die gleichen Netzhautbilder liefern, wie die tatsächlich vorhandenen Gegenstände unter Einschaltung der optischen Instrumente. Einen Gegenstand von dieser Beschaffenheit können wir das durch die optischen Instrumente erzeugte Raumbild nennen. Bemerken wir sogleich, daß dieses Raumbild stets eindeutig bestimmt ist. Sind O_l und O_r die Orte des rechten und linken Auges, P_l und P_r die Orte eines bestimmten realen Punktes in den dem rechten und linken Auge dargebotenen durch die optischen Einrichtungen erzeugten Bildern, so erhalten wir den entsprechenden Ort im Raumbild als den Schnittpunkt der Linien $O_l P_l$ und $O_r P_r$[1]. Von dieser Frage müssen wir die andere sondern, welches der unter den gegegebenen Umständen erzeugte Seheindruck ist. Diese Frage würde mit jener ersten zusammenfallen, wenn (nach der Anschauung der älteren Projektionstheorie) anzunehmen wäre, daß der scheinbare Ort eines Gegenstandes durch

[1] Allerdings ist das hier für das „Raumbild" aufgestellte Merkmal (Übereinstimmung der von ihm bei freiäugiger Betrachtung erzeugten Netzhautbilder mit denjenigen, die die realen Gegenstände unter Einschaltung der optischen Instrumente erzeugen) nicht in aller Strenge und in vollem Umfange zu verwirklichen. Wie leicht ersichtlich, gestattet es verschiedene Spezialisierungen, denen zufolge jene Übereinstimmung dann in gewissen Hinsichten bestehen, in anderen dagegen Abweichungen eintreten würden. Je nach der hier getroffenen Wahl würde in der obigen Konstruktion als Ort des Auges der Knotenpunkt, der Kreuzungspunkt der Visierlinien oder der Drehpunkt in Rechnung zu bringen sein. Da jedoch diese Unterschiede für unsere Zwecke ohne nennenswerten Belang sind, so ist es zulässig, hier in summarischer Weise vom Orte des Auges zu sprechen und dem so definierten Raumbilde die erwähnte Eigenschaft zuzuschreiben.

den Schnittpunkt seiner rechts- und linksäugigen Visierlinie gegeben wäre. Da dies nicht der Fall ist, so bestimmt sich der Seheindruck in einer weit verwickelteren Weise; er ist, wie wir hier sogleich hervorheben wollen, überhaupt nicht eindeutig durch die Abbildungsverhältnisse bestimmt, und die Frage nach seiner Beschaffenheit führt uns daher auf eine Reihe spezifisch physiologischer Erwägungen.

Obwohl es nun selbstverständlich die Seheindrücke und ihre Beziehungen zu den realen Gegenständen sind, die uns in letzter Instanz interessieren, empfiehlt es sich doch als das sehr viel Einfachere, zunächst die Beschaffenheit der Raumbilder ins Auge zu fassen. Einer etwas allgemeineren Besprechung schicke ich die Erwähnung einiger besonders einfacher Spezialfälle voraus. Wir erhalten ein dem realen Gegenstand kongruentes Raumbild, ein tautomorphes nach der Bezeichnungsweise v. Rohrs, wenn wir zwei Photographien mit einer dem Augenabstand gleichen Basis aufnehmen, die erhaltenen Photogramme aus einer Entfernung betrachten, die dem Abstand der Platten von den photographischen Objektiven gleich ist und endlich noch eine dritte Bedingung erfüllen. Diese bezieht sich auf den den beiden Bildern zu gebenden Lateralabstand bzw. die zur Betrachtung bestimmter Punkte erforderlichen Augenkonvergenzen, und kann dahin formuliert werden, daß die Augen, wenn sie entsprechende (denselben realen Punkt darstellende) Punkte des rechten und linken Bildes fixieren, dieselbe Konvergenz haben, die sie auch hätten haben müssen, um die betr. realen Punkte zu fixieren, wenn sie sich an der Stelle der Aufnahmeapparate befunden hätten. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß in diesem Falle, soweit Netzhautbilder und Augenstellungen in Frage kommen, wirklich ganz dieselben Verhältnisse hergestellt sind, wie wenn die Augen sich an Stelle der Objektive der Aufnahmeapparate befänden und die realen Gegenstände direkt wahrnähmen.

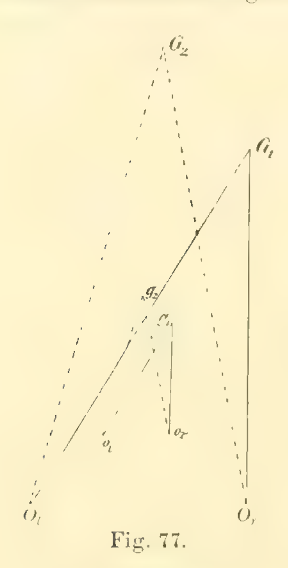


Fig. 77.

Eine einfache Überlegung lehrt ferner, daß das Telestereoskop ein den realen Gegenständen streng ähnliches Raumbild liefert, welches wir (gleichfalls im Anschluß an v. Rohr) ein homöomorphes nennen wollen. Man braucht, um dies einzusehen, sich nur klar zu machen, daß jeder Lichtstrahl, der gegen das virtuelle von den beiden Spiegeln entworfene Bild eines Auges gerichtet ist, nach der Spiegelung in der gleichen Richtung gegen das wirkliche Auge geht. Sind daher (Fig. 77) o_l und o_r die Orte der beiden Augen, O_l und O_r die Orte ihrer durch die beiden Spiegel entworfenen virtuellen Bilder, so erhalten wir das Raumbild eines realen Punktes G_1, indem wir von o_l und o_r Parallele zu den Linien $O_l G_1$ und $O_r G_1$ ziehen, als den Schnittpunkt dieser Linien, g_1. Da das gleiche für jeden Punkt G_2 und seinen Ort im Raumbilde g_2 gilt, so ist ohne weiteres ersichtlich, daß die realen Gegenstände und ihr Raumbild geometrisch ähnliche Gebilde darstellen, und daß die virtuellen Bilder der Augen innerhalb jener die entsprechenden Stellen einnehmen wie die Augen selbst innerhalb des Raumbildes. Demgemäß steht denn auch das Raumbild zu den wirklichen Gegenständen in demselben Größenverhältnis wie der Abstand der Augen zu der vergrößerten Basis, dem Abstande ihrer durch die Spiegel entworfenen virtuellen Bilder.

Behufs einer allgemeineren Betrachtung der Raumbilder wollen wir dadurch eine Vereinfachung einführen, daß wir uns auf einen Gegenstand beschränken, dessen sämtliche Abmessungen im Vergleich zu seinem Abstand vom Beobachter gering sind. Unter diesen Voraussetzungen können wir den Ortswechsel als eine für alle Punkte des Gegenstandes in demselben Verhältnis erfolgende Veränderung des Abstandes behandeln und kurz von einer Veränderung der Entfernung zwischen Beobachter und Gegenstand in toto sprechen. Auch können wir bei dieser Beschränkung uns ein in beliebigem Verhältnis vergrößertes oder verkleinertes Modell in einem Abstand angebracht denken, der im Vergleich zu dem tatsächlich gegebenen in bestimmtem Verhältnis vergrößert oder verkleinert ist, Entfernung und Modellmaßstab also als zwei unabhängige Veränderliche behandeln, während für Gegenstände von größeren Abmessungen natürlich die Forderung einer für alle Punkte gleichen Entfernungsänderung mit der geometrischen Ähnlichkeit in Widerspruch geraten würde.

Gemäß dem oben Bemerkten könnten wir nun fragen, unter welchen Bedingungen ein Raumbild erzeugt wird, das mit einem in beliebiger Entfernung befindlichen und in irgend einem Maßstab ausgeführten ähnlichen Modell des Gegenstandes übereinstimmt. Aus Gründen, die alsbald ersichtlich werden, wollen wir jedoch sogleich die Beschaffenheit der Raumbilder, ebenso auch später der Seheindrücke speziell in einigen bestimmten Hinsichten ins Auge fassen, die für die Charakterisierung der Erscheinungsweise, sei es der wirklichen Gegenstände, sei es des Raumbildes vorzugsweise von Bedeutung sind. Indem wir prüfen, wie diese einerseits durch Änderungen des Abstandes und des Modellmaßstabes, andererseits aber durch die in unseren optischen Intrumenten verfügbaren Einrichtungen modifiziert wird, gelangen wir dazu, nicht nur die Bedingungen zu übersehen, unter denen Raumbilder von den erwähnten ausgezeichneten Beschaffenheiten (orthomorphe) erhalten werden, sondern auch die in anderen Fällen unvermeidlichen Abweichungen in ihrer Art und Bedeutung des genaueren zu beurteilen. An erster Stelle ziehen wir hier die scheinbare (Winkel-) Größe einer bestimmten der Frontalebene parallelen Erstreckung in Betracht; und zwar wollen wir, um zu einer bestimmten Bezeichnung zu gelangen, den Winkelwert der frontal erstreckten Längeneinheit mit q bezeichnen und in folgendem kurz Frontalwert nennen. Er würde also z. B., worauf später im Zusammenhang zurückzukommen ist, mit wechselnder Entfernung dieser umgekehrt proportional sich ändern.

An zweiter Stelle haben wir die Erscheinungsweise der in der Tiefenrichtung verlaufenden Erstreckung in Betracht zu ziehen, und zwar zunächst so, wie sie sich für die Betrachtung mit einem Auge darstellt. Erwägt man, daß zu den hier in Betracht kommenden veränderlichen Bedingungen des Sehens jedenfalls die Entfernung des Gegenstandes vom Beobachter gehören sollte, und daß für Gegenstände mit Tiefenerstreckung die ganze Erscheinung sich mit wechselndem Abstand zufolge der perspektivischen Verschiebungen in mannigfacher Weise ändern wird, so ist klar, daß die Charakterisierung dieser Verhältnisse durch einen bestimmten Wert nur durch die einigermaßen willkürliche Herausgreifung eines bestimmten Kriteriums möglich ist. Indessen wird sich zeigen, daß die Betrachtung eines solchen für unsere Zwecke in der Tat genügt. Ich wähle hierfür die Winkelgröße einer in der Tiefenrichtung verlaufenden (kleinen) Erstreckung, die um einen bestimmten (kleinen) Abstand vom fixierten

Punkt entfernt ist. In Fig. 78 sei y jener Abstand, z der Betrag der Tiefenerstreckung, E die Entfernung des Gegenstandes vom Beobachter, so ist unter der hier gemachten Voraussetzung der kleine Bogen x

$$x = z \cdot \frac{y}{E}$$

und jener Winkelwert $\tau = \frac{z \cdot y}{E^2}$.

Wir wollen den Winkelwert, unter dem eine der Längeneinheit gleiche und um die Längeneinheit vom fixierten Punkt abstehende Tiefenerstreckung erscheint, den monokularen Tiefenwert nennen und mit τ bezeichnen. Er ist, wie ersichtlich, dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional.

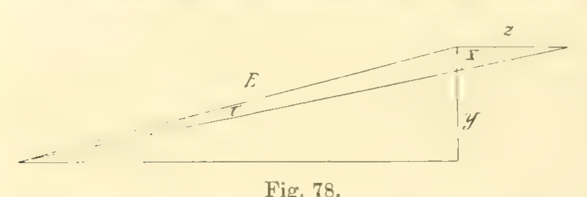


Fig. 78.

An dritter Stelle haben wir die binokularen Erscheinungen der Tiefenerstreckung in Betracht zu ziehen. Wir charakterisieren diese durch die relative Parallaxe eines um einen bestimmten Abstand vor oder hinter dem fixierten Punkt liegenden Punktes. Dieser Wert ist, wie früher gezeigt $=, \frac{2a.b}{E^2}$, wenn $2a$ den Augenabstand, b den Tiefenabstand des betr. Punktes vom fixierten und E wiederum die Entfernung vom Beobachter bedeutet.

Wir nehmen auch hier b gleich der Längeneinheit an und wollen den so erhaltenen Wert der relativen Parallaxe eines um die Längeneinheit vor oder hinter dem fixierten Punkt gelegenen Punktes im folgenden kurz den binokularen Tiefenwert nennen. Er mag mit β bezeichnet werden und wäre also proportional $\frac{2a}{E^2}$.

Die drei hier in Betracht gezogenen Werte φ, τ und β charakterisieren in gewisser Weise die Art, wie ein Gegenstand von bestimmter Beschaffenheit unter irgendwelchen Bedingungen gesehen wird, und wir hätten nun weiter in Betracht zu ziehen, wie diese Werte von den verschiedenen Bedingungen abhängen. Unter diesen stellen wir die Entfernung des Beobachters vom Gegenstand voran. Der Einfluß dieser ist aus den oben angeführten Formeln direkt zu entnehmen. Denken wir uns die Entfernung im Verhältnis von $1:\varepsilon$ geändert und bezeichnen wir die entsprechend geänderten Werte mit φ_ε, τ_ε und β_ε, so ist $\varphi_\varepsilon = \varphi/\varepsilon$, dagegen $\tau_\varepsilon = \tau/\varepsilon^2$ und $\beta_\varepsilon = \beta/\varepsilon^2$. Mit ab(zu)nehmender Entfernung zwischen Objekt und Beobachter nehmen die Frontalwerte im einfachen, die monokularen Tiefenwerte ebenso wie die binokulare Parallaxe im quadratischen Verhältnis zu bzw. ab.

Der zweite Fall, den wir in Betracht zu ziehen hätten, ist eine geometrisch ähnliche Vergrößerung oder Verkleinerung desselben Objektes, die Ersetzung desselben durch ein ihm ähnliches Modell. Bezeichnen wir mit μ das Verhältnis, in dem wir uns die Dimensionen des Objektes geändert denken, den Modellmaßstab, und ebenso wie vorher die Änderungen der uns beschäftigenden Werte durch den Index μ, so ergibt sich

$$\varphi_\mu = \mu \cdot \varphi.$$

Dagegen wird, da in dem für τ gefundenen Werte sowohl y als z im Verhältnis $1:\mu$ sich ändern, $\tau_\mu = \mu^2\tau$.

Jn dem Ausdruck der binokularen Parallaxe endlich ändert sich nur b; und wir erhalten daher $\beta_\mu = \mu \cdot \beta$.

Es ergibt sich also

$$\varphi_\mu = \mu \cdot \varphi$$
$$\tau_\mu = \mu^2 \cdot \tau$$
$$\beta_\mu = \mu \cdot \beta.$$

Bei der Ersetzung des Gegenstandes durch ein ihm geometrisch ähnliches Modell in gleicher Entfernung ändern sich die Frontalwerte und ebenso die binokularen Tiefenwerte im einfachen, die monokularen Tiefenwerte dagegen im quadratischen Verhältnis.

Auf der anderen Seite haben wir nun diejenigen Änderungen in Betracht zu ziehen, die durch optische Vorrichtungen bedingt werden können. Wir fassen hier zunächst diejenigen ins Auge, die wir beim Fernrohr in erster Linie zu berücksichtigen gewohnt sind. Bezeichnen wir mit v den Winkel, unter dem das Bild irgend eines Objektes für das hinter dem Fernrohr befindliche Auge von der Achsenrichtung des Instrumentes abweicht, so ist bekanntlich $\operatorname{tg} v = \alpha \cdot \operatorname{tg} v'$, wenn v' den analogen Winkel bedeutet, unter dem der entsprechende reale Objektpunkt für einen bestimmten vorderen Punkt von der Achsenrichtung abweicht. Wir können, da wir uns hier auf kleine Winkel beschränken, statt dessen schreiben:

$$v = \alpha v'.$$

Ferner wollen wir denjenigen vorderen Punkt, welcher mit dem beobachtenden Auge in jener Beziehung steht (er wird im allgemeinen im Objektiv liegen), den Aufnahmepunkt nennen, und wir wollen jenen die Änderung der Winkel angebenden Koeffizienten, der ja beim Fernrohr das bedeutet, was wir seine Vergrößerung zu nennen pflegen, im folgenden allgemein als Fernrohrvergrößerung bezeichnen, und dafür das Symbol α benutzen. — Es sei in bezug hierauf gleich bemerkt, daß sie beim Mikroskop im allgemeinen zwar von 1 verschieden sein wird, daß aber für diese Instrumente die Vergrößerung eine andere Bedeutung hat. Demgemäß kann auch ein Mikroskop ohne Fernrohrvergrößerung (für das also $\alpha = 1$ ist) doch in dem Sinne, wie wir dies beim Mikroskop nehmen, eine von 1 verschiedene Vergrößerung besitzen, ein Punkt, der uns später noch beschäftigen wird. Ferner sind im Stereoskop, wenn der Abstand der photographischen Platte vom Objektiv $= P$, die Betrachtungsweite $= B$ ist, die Winkel im Verhältnis von P zu B vergrößert. Wir können also dieser Einrichtung eine Fernrohrvergrößerung $= P/B$ zuschreiben. Bringen wir vor beide Augen optische Instrumente von der Fernrohrvergrößerung α, so sind Frontalwerte, monokulare und binokulare Werte der Tiefe für die Augen das αfache von denjenigen Werten, die für die realen Gegenstände und die Aufnahmepunkte gelten; also wenn wir diese Werte mit φ, τ und β und die durch die Fernrohrvergrößerung modifizierten mit φ_a, τ_a und β_a bezeichnen:

$$\varphi_a = \alpha\varphi; \quad \tau_a = \alpha\tau; \quad \beta_a = \alpha\beta.$$

Durch eine „Fernrohrvergrößerung" (einschließlich der analogen, durch Aufnahme und Betrachtung von Photographien zu erzielenden Verhältnisse) ändern sich also Frontalwerte, monokulare und binokulare Tiefenwerte übereinstimmend in dem durch die Fernrohr-

vergrößerung des optischen Instrumentes bzw. die erwähnten Beziehungen von photographischer Aufnahme und Betrachtung bestimmten Verhältnis.

Wir müssen ferner als einen zweiten Erfolg optischer Einrichtung das anreihen, was wir kurz eine Abstandsänderung der Aufnahmepunkte nennen können. Beim einfachen Telestereoskop sehen die Augen die Gegenstände so, wie sie von denjenigen Orten aus erscheinen würden, wo die durch die Spiegel des Instruments entworfenen virtuellen Bilder der Augen liegen. Wir wollen, im Anschluß an die eben angeführte Bezeichnung, auch diese Punkte die Aufnahmepunkte nennen; ferner soll (an übliche Benennungen anknüpfend) ihr Abstand die Basis genannt werden. Das Verhältnis der Basis zum Augenabstand sei mit δ bezeichnet. Der Wirkung des Telestereoskops gleich sind, wie ohne weiteres einleuchtet, die Erfolge, die wir erhalten, wenn wir zwei Photographien in anderem als dem Abstand der Augen aufnehmen und diese zur Betrachtung und stereoskopischen Vereinigung darbieten. Auch für diesen Fall wollen wir mit δ das Verhältnis der Aufnahmebasis zum Augenabstand bezeichnen.

Sind wiederum φ, τ und β die Werte, die für die wirklichen Augen bestehen würden, wenn sie sich in der Entfernung vom Gegenstande befinden, wie dies für die Aufnahmepunkte der Fall ist, und φ_δ, τ_δ und β_δ, die durch die Veränderung der Basis modifizierten, so ergibt sich

$$\varphi_\delta = \varphi; \quad \tau_\delta = \tau; \quad \beta_\delta = \delta \cdot \beta.$$

Durch eine Änderung der Basis im Verhältnis $1:\delta$, sei es durch eine optische Einrichtung nach Art des Telestereoskops, sei es durch entsprechende Aufnahme und Betrachtung von Photographien, ändern sich also die Frontal- und monokularen Tiefenwerte gar nicht, während die binokularen Tiefenwerte im Verhältnis $1:\delta$ sich ändern.

Wir sind nun hiernach leicht imstande die Bedingungen anzugeben, die erfüllt sein müssen, damit bei irgend einer Basis und irgend einer Fernrohrvergrößerung die Augen in der nämlichen Weise affiziert werden, wie wenn sie ohne optisches Instrument ein geometrisch ähnliches Modell in beliebiger Entfernung erblicken. Es ist dazu erforderlich, daß die in dem einen und anderen Falle erhaltenen Modifikationen der Werte φ, τ und β übereinstimmen. Es muß als $\alpha\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}\varphi$; $\alpha\tau = \frac{\mu^2}{\varepsilon^2}\tau$ und $\alpha\delta\beta = \frac{\mu}{\varepsilon^2}\beta$ sein, oder

$$\alpha = \frac{\mu}{\varepsilon}$$

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\varepsilon^2}$$

$$\alpha\delta = \frac{\mu}{\varepsilon^2}.$$

Die hier berücksichtigten optischen Verhältnisse (Fernrohrvergrößerung und Basis) sind nun zur eindeutigen Bestimmung des Raumbildes noch nicht genügend. Vielmehr hängt die Beschaffenheit desselben noch von einem weiteren Umstande ab. Die erwähnten Beschaffenheiten der optischen Einrichtung bestimmen nämlich, wie wir kurz sagen können, die Netzhautbilder; sie lassen

es aber zunächst unbestimmt, welcher Konvergenzgrad der Augen für die binokulare Fixation eines bestimmten Punktes erforderlich ist.

Diese Verhältnisse können z. B. beim Telestereoskop durch eine von der Parallelstellung abweichende Anordnung der Spiegel verändert werden; ähnlich beim gewöhnlichen Stereoskop dadurch, daß die vom rechten und linken Auge zu betrachtenden Bilder in verschiedene Abstände voneinander gebracht werden. Durch diese Verhältnisse ändert sich die Entfernung des Raumbildes und es ändern sich damit zugleich die bestimmten Frontalwerten usw. entsprechenden Abmessungen des Raumbildes.

Trotz dieses Umstandes gestatten uns aber die obigen Gleichungen einige wichtige Folgerungen in bezug auf die Beschaffenheit der Raumbilder ohne weiteres anzugeben. Betrachtet man die obigen drei Gleichungen, so sieht man sogleich, daß den beiden ersteren Bedingungen nur genügt werden kann, wenn α:1 ist. Ein Raumbild, das mit einem geometrisch ähnlichen Modell des Gegenstandes übereinstimmt, ist also nur möglich bei Instrumenten, die keine Fernrohrvergrößerung besitzen, für die $\alpha = 1$ ist. Ist diese Bedingung erfüllt, so wird den obigen Gleichungen entsprochen, wenn $\mu = \varepsilon = \frac{1}{\delta}$ ist, d. h. ein Instrument ohne Fernrohrvergrößerung und mit einer Basis, die das δfache des Augenabstandes ist, liefert ein Raumbild, das in bezug auf frontale, monokulare und binokulare Tiefenwerte übereinstimmt mit einem im Maßstabe $\frac{1}{\delta}$ ausgeführten Modell des realen Gegenstandes, welches aus einer Entfernung betrachtet wird, die $\frac{1}{\delta}$ ist von der Entfernung des realen Gegenstandes von den Aufnahmepunkten. Da nun frontale, monokulare und binokulare Tiefenwerte bei einer bestimmten Entfernung die ganze Anordnung aller Punkte eindeutig bestimmen, so wird das Instrument ein mit einem solchen Modell übereinstimmendes, also homöomorphes Raumbild dann liefern, wenn dies nach Maßgabe der soeben erwähnten Einrichtungen in eben jener Entfernung erzeugt wird. Ein Instrument ohne Fernrohrvergrößerung und mit einer Basis, die das δfache des Augenabstandes ist, liefert also ein homöomorphes und im Verhältnis δ:1 verkleinertes Raumbild, wenn dieses in einer Entfernung erzeugt wird, die zu der Entfernung des realen Gegenstandes von den Aufnahmepunkten im Verhältnis von 1:δ steht. Da die Entfernung, in der das Raumbild erzeugt wird, sich durch besondere Einrichtungen der Instrumente bestimmt und es sich demgemäß empfiehlt, sie als eine unabhängige Veränderliche zu behandeln, so wollen wir für die hier in Frage kommende, zur Erzeugung eines homöomorphen bzw. tautomorphen Raumbildes erforderliche Entfernung eine besondere Benennung einführen und sie als die orthomorphe Entfernung bezeichnen. Sie ist $= \frac{A}{\delta}$, wenn wir mit A den Abstand des realen Gegenstandes von den Aufnahmepunkten bezeichnen.[1]

[1]) Es sei hier daran erinnert, daß diese Verhältnisse beim gewöhnlichen Telestereoskop (ohne Fernrohrvergrößerung und mit parallelen Spiegeln) verwirklicht sind. Die obige Betrachtung läßt erkennen, daß gerade die letztere Bedingung für die Homöomorphie von wesentlicher Bedeutung ist. Auf ihr beruht es, daß die von den Augen zu einem Punkte des Raumbildes gezogenen Linien unter dem nämlichen Winkel konvergieren, wie die von

Sobald α von 1 verschieden ist, ist die Erzeugung eines homöomorphen Raumbildes ausgeschlossen. Die in diesen Fällen erzeugten Raumbilder werden also von einem geometrisch ähnlichen Modell der Gegenstände mehr oder weniger verschieden, sie werden entstellte sein; wir können sie im Anschluß an v. ROHR porrhallaktische nennen. Überall also, wo die optischen Einrichtungen eine von 1 verschiedene Fernrohrvergrößerung besitzen, werden porrhallaktische Raumbilder erhalten; und es gilt dies, wie aus dem Obigen hervorgeht, ganz unabhängig davon, wie wir jenen hier zuletzt erwähnten, die Entfernung des Raumbildes bestimmenden Faktor gestalten; es ist bei einer von 1 verschiedenen Fernrohrvergrößerung unmöglich Netzhautbilder zu erzeugen, die bei irgendwelcher in dieser letzteren Beziehung zu treffenden Anordnung ein homöomorphes Raumbild liefern.

Sind nun aber auch streng homöomorphe Raumbilder unmöglich, so schließt dies doch nicht aus, daß solche erhalten werden können, denen durch eine eingeschränkte Übereinstimmung mit homöomorphen eine ausgezeichnete Bedeutung zukommt. Dies ist nun m. E. in der Tat der Fall und wir werden auf sie geführt, wenn wir unter Absehung von den monokularen Tiefenwerten unsere Betrachtung auf die Frontal- und binokularen Tiefenwerte beschränken. Zunächst ist ohne weiteres ersichtlich, daß, wie wir auch Fernrohrvergrößerung und Basis wählen, unter allen Umständen ein Raumbild erhalten wird, das in bezug auf jene beiden Werte mit einem in bestimmter Entfernung befindlichen geometrisch ähnlichen Modell des Gegenstandes übereinstimmt. Wir erhalten nämlich als Bedingungen hierfür

$$\mu = \frac{\alpha}{\delta} \text{ und } \varepsilon = \frac{1}{\delta},$$

Gleichungen, denen durch bestimmte Werte von μ und ε entsprochen wird, gleichviel welche Werte auch α und δ haben mögen. Auch ein solches Raumbild wird nun mit jenem Modell in ganz bestimmten Hinsichten übereinstimmen, sobald es in der gleichen Entfernung erzeugt wird. Denn da bei bestimmter Entfernung dem frontalen Winkelwert eine ganz bestimmte frontale Erstreckung entspricht, ebenso der binokularen Parallaxe eine ganz bestimmte Tiefendifferenz, so ist klar, daß ein Raumbild der hier angenommenen Beschaffenheit mit dem geometrisch ähnlichen Modell übereinstimmen wird in bezug auf frontale Erstreckungen und in bezug auf die Tiefenlage aller Punkte.

Ein solches Raumbild würde also korrekt sein, d. h. mit einem ähnlichen Modell des Gegenstandes übereinstimmen in bezug auf die Anordnung aller einer und derselben Frontalebene angehörigen Punkte, ferner in bezug auf die Tiefenlage aller Punkte. Dagegen würde es von ihm Abweichungen zeigen hinsichtlich der monokularen Tiefenwerte, allgemeiner gesagt in bezug auf die Winkelabstände zweier verschiedenen Schichten angehörigen Punkte. Wir wollen auf die Natur und Bedeutung dieser Abweichungen unten nochmals kurz zurückkommen. Bemerken wir hier, daß vor allem insofern eine Übereinstimmung solcher Raumbilder mit einem geometrisch ähnlichen Modell und demgemäß auch mit den Gegenständen selbst stattfindet, als das Verhältnis der frontalen zu den sagittalen Erstreckungen das gleiche ist, die Tiefenwerte zu den frontalen Abmessungen im richtigen Verhältnis stehen. Da es in gewissem Umfange üblich

den virtuellen Bildern der Augen zu dem entsprechenden realen Punkte gezogenen oder, m. a. W., daß das Raumbild tatsächlich in der orthomorphen Entfernung erzeugt wird.

geworden ist, speziell für die Tiefenverhältnisse den Ausdruck der Plastik zu gebrauchen, so will ich Raumbilder von dieser Beschaffenheit orthoplastische nennen.

Das orthoplastische Raumbild wäre also dadurch ausgezeichnet, daß in ihm das Verhältnis der Tiefenabmessungen zu den frontalen das richtige ist. Auch wollen wir im Gegensatz hierzu dasjenige hyperplastisch bzw. hypoplastisch nennen, bei denen die Tiefenwerte im Vergleich zu den frontalen zu groß bzw. zu klein sind.[1]

Die Bedingung für die orthoplastische Beschaffenheit ist, wie schon erwähnt, wiederum dadurch gegeben, daß das Raumbild in einer bestimmten Entfernung erzeugt wird, die wir, im Anschuß an die frühere Bezeichnung, kurz die orthoplastische Entfernung nennen wollen. Wir finden für sie danach hier den Wert $S = \frac{A}{\delta}$ und zugleich wird $\mu = \frac{\alpha}{\delta}$.[2]

Ein Instrument mit der Fernrohrvergrößerung α und der Basisvermehrung δ liefert also ein orthoplastisches Raumbild, wenn dasselbe in einer Entfernung $\frac{A}{\delta}$ erzeugt wird; dabei ist der Modellmaßstab $= \frac{\alpha}{\delta}$, d. h. es besteht jene als Orthoplastik definierte teilweise Übereinstimmung des Raumbildes mit einem im Maßstab $\frac{\alpha}{\delta}$ ausgeführten Modell des Gegenstandes.

Wenn wir nach diesen Vorbemerkungen über die physikalisch-optischen Verhältnisse uns zur Besprechung des Seheindruckes wenden, so müssen wir vor allem im Auge behalten, daß es sich hier um wahrgenommene räumliche Verhältnisse handelt, deren subjektive Natur strenge und genaue Maßbestimmungen überhaupt unangängig macht; alle geometrischen Angaben können daher nur als annähernd und in bedingtem Sinne als gültige betrachtet werden. Unter dieser Einschränkung können wir den Seheindruck nach Maßgabe der allgemeinen in der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen entwickelten Gesetze beurteilen. Wir haben ihnen zufolge die Bedingungen auseinander zu halten, von denen einerseits die Richtungen, andererseits die Entfernungen des Gesehenen abhängen. Was die ersteren anlangt, so kann für die gegenwärtigen Zwecke die Anordnung in der Wahrnehmung als mit derjenigen im Raumbilde identisch betrachtet und durch sie ersetzt werden.[3]

---

[1] Für die Bezeichnungen erwächst hier eine gewisse Schwierigkeit daraus, daß es üblich geworden ist, von einer Vermehrung oder Steigerung der Plastik auch in dem Sinne zu reden, daß dadurch die Steigerung unserer Wahrnehmungsfähigkeit für die Tiefenverhältnisse gemeint ist, was bei orthoplastischen, ja auch bei homöomorphen Raumbildern der Fall sein kann. In diesem Sinne ist z. B. dem einfachen Telestereoskop eine Steigerung der Plastik zuzuschreiben, wiewohl es andererseits von normaler Plastik (nicht etwa hyperplastisch) zu nennen ist. Um hier Verwechslungen vorzubeugen, dürfte es sich empfehlen, die Instrumente, die in diesem letzteren Sinne die Plastik vermehren, etwa auxoplastisch zu nennen.

[2] Es wird nützlich sein, hier daran zu erinnern, daß unsere Betrachtung sich auf Gegenstände von sehr geringen Dimensionen beschränkt. Nur für solche können die Merkmale der Orthoplastik ohne diejenigen der Homöomorphie zutreffen, während für Gegenstände von größeren Dimensionen, wie man leicht sieht, die Forderungen der orthoplastischen Entfernung auf Widersprüche führt, wenn das Raumbild nicht ein homöomorphes ist.

[3] Diese Annahme ist freilich nicht ganz streng zutreffend; es bleiben dabei namentlich die Unterschiede der Winkelanordnung für das rechte und linke Auge, die Erscheinungen der

Eine eingehendere Berücksichtigung erfordern dagegen die Verhältnisse der Entfernung. Es ist hier vor allem zu beachten, daß die absoluten Entfernungen, in der die Gegenstände wahrgenommen werden, in einer mannigfaltigen Weise von einer Reihe ganz verschiedener Umstände abhängen, insbesondere nicht ohne weiteres durch den Konvergenzgrad der Augen sich bestimmen. Die nämlichen optischen Verhältnisse (gleiche Netzhautbilder bei gleichen Augenstellungen) können also hinsichtlich der Entfernung sehr verschiedene Eindrücke hervorrufen. Andererseits ergeben die Unterschiede der rechts- und linksäugigen Netzhautbilder (die binokularen Parallaxen oder Querdisparationen) und, was damit zusammenhängt, die zur sukzessiven Fixation verschiedener Punkte erforderlichen Vermehrungen oder Verminderungen der Konvergenz zwar in zwingender Weise die relative Tiefenanordnung der einzelnen gesehenen Punkte; aber die so erzeugten Tiefeneindrücke sind hinsichtlich ihres Betrages auch wiederum von jenen in mannigfaltiger Weise bestimmten und modifizierbaren absoluten Entfernungen abhängig. Wie diese Dinge zusammenhängen, können wir durch eine ganz feste und streng gültige Regel vor der Hand nicht ausdrücken. Doch dürfen wir, wie oben gezeigt,[1] jedenfalls von der Annahme als der zurzeit wahrscheinlichsten ausgehen, daß, wenn ein Gegenstand in der Entfernung E wahrgenommen wird, der Scheindruck hinsichtlich seiner Tiefendimensionen annähernd die Beschaffenheit haben wird, die ein tatsächlich in jener Entfernung befindlicher Gegenstand haben müßte, um Netzhautbilder von der gegebenen Beschaffenheit, insbesondere von den gegebenen Unterschieden des rechts- und linksäugigen Bildes zu erzeugen.[2] Hierfür ist, wie wir sahen, erforderlich, daß die gesehenen Tiefen in einer bestimmten und nicht ganz einfachen Weise von der scheinbaren Entfernung des gerade fixierten Punktes und den jeweiligen Parallaxen abhängen; und wir hatten diese Art der binokularen Tiefenwahrnehmung (deren annähernde Verwirklichung, wie gesagt, als wahrscheinlich gelten darf) eine proportionierte genannt.

Daß freilich diese Annahme sicher keine ganz allgemein und streng zutreffende ist, geht aus Früherem schon hervor und es sei darauf auch hier gleich ausdrücklich hingewiesen. Sie ist aber die einzige, die wir als eine wenigstens in gewissem Umfange und annähernd zutreffende ansehen und der Ableitung bestimmter Regeln in bezug auf die binokularen Intrumente zugrunde legen können. Es scheint mir daher ganz unerläßlich, die Theorie der binokularen Instrumente zunächst auf dieser Grundlage vollständig zu entwickeln.

Diplopie usw. außer Betracht. Indessen können diese Dinge unter den hier gemachten Voraussetzungen und für den gegenwärtigen Zweck unberücksichtigt bleiben. Es wird dies um so mehr zulässig erscheinen, wenn man beachtet, daß, wie das Raumbild, so auch der Scheindruck kein ganz streng und eindeutig bestimmter Begriff ist, da die Lokalisationen bei verschiedenen Augenstellungen nicht genau übereinstimmen. Wir brauchen im Hinblick hierauf als Scheindruck nicht gerade die Gesamtheit dessen zu nehmen, was bei einer bestimmten Augenstellung im ganzen Gesichtsfelde gesehen wird, sondern können auch für jeden Punkt diejenige Richtung in Anrechnung bringen, in der er erscheint, wenn er binokular fixiert wird. Bei dieser Auffassung wird die hier gemachte Annahme noch weniger zu beanstanden sein.

[1] Siehe oben S. 318.

[2] Sind E_1 und E_2 die wahren, E_1' und E_2' die scheinbaren Entfernungen zweier Punkte, so würde dieser Voraussetzung zufolge die Parallaxe zwischen E_1' und E_2' gleich derjenigen zwischen E_1 und E_2 sein, und es würde zu einem Fixationswechsel zwischen E_1' und E_2' die nämliche Änderung der Konvergenz erforderlich sein wie zu einem solchen zwischen E_1 und E_2.

Allerdings wird es geboten sein, dann auf die Bedeutung der so sich ergebenden Regeln noch einmal zurückzukommen.

Gehen wir von dieser Annahme aus, so folgt, daß der Seheindruck irgend einem der Raumbilder entsprechen wird, die bei den tatsächlich gegebenen Netzhautbildern aber beliebig wechselnden Konvergenzgraden erhalten werden. Die Konvergenz der Augen — so können wir den Sachverhalt kurz ausdrücken — die als eine Variable in die Bestimmung des Raumbildes mit eingeht und sie zu einer eindeutigen macht, fällt für den Seheindruck fort, und so ergibt sich für diesen zunächst als möglich die Gesamtheit der Raumbilder, die durch Variierung dieses Faktors erhalten werden. Welcher von den vielen hiernach möglichen Eindrücken tatsächlich verwirklicht ist, das ist nicht ohne weiteres und ist überhaupt nicht allgemein angebbar, sondern es hängt von den mannigfaltigen, die Entfernungseindrücke bestimmenden Umständen in verwickelter Weise ab.

Die Beziehungen der verschiedenen Raumbilder sind wenigstens in einigen Hinsichten leicht zu übersehen. So muß namentlich ein entfernter Gegenstand, um Netzhautbilder von gleicher Frontalgröße und binokularer Parallaxe zu geben, nicht nur größer, sondern im Verhältnis tiefer sein als ein naher. Demgemäß wird auch bei bestimmten Netzhautbildern unter den hier gemachten Voraussetzungen eine Reihe von Seheindrücken möglich sein, die mit wechselnder Entfernung größer und, wenigstens soweit die binokulare Tiefenwahrnehmung in Betracht kommt, verhältnismäßig tiefer werden. Bei Netzhautbildern, die für eine bestimmte Entfernung einen orthoplastischen oder homöomorphen Seheindruck ergeben, wird also der Seheindruck hypoplastisch sein, wenn die scheinbare Entfernung geringer, hyperplastisch, wenn sie größer ist, als jene. Es wird nützlich sein, dieses Verhältnis sogleich an einem der oben schon berührten ausgezeichneten Fälle, dem einfachen Telestereoskop zu erläutern. Wie oben erwähnt, liefert das Instrument ein homöomorphes Raumbild, und zwar ist dies in dem Verhältnis verkleinert, in dem der Abstand der Augen kleiner ist als der Abstand ihrer von den Spiegelpaaren entworfenen virtuellen Bilder. Einem solchen verkleinerten Modell wird, wie wir das nach den obigen Ausführungen erwarten dürfen, der Seheindruck wirklich entsprechen, wenn das Objekt tatsächlich in der entsprechenden geringen Entfernung gesehen wird, während es in anderen Entfernungen wahrgenommen, auch hinsichtlich seiner Form verändert (bei größerem Abstand mit übertriebenem Relief) gesehen werden wird. Ob aber das eine oder andere eintritt, entzieht sich der Fixierung durch eine allgemeine Regel. Dies bestätigt nun die Erfahrung in der Tat, und es scheint die Art des durch das Telestereoskop hervorgerufenen Eindrucks in hohem Grade von individuellen Eigentümlichkeiten, übrigens wohl auch von der Art der betrachteten Gegenstände abzuhängen. So gibt HELMHOLTZ ja an, die Objekte (z. B. menschliche Figuren) als stark verkleinerte Modelle in richtigen Verhältnissen gesehen zu haben. Abweichend hiervon findet GRUTZNER[1], daß die Gegenstände ihm nicht so stark verkleinert und in übertriebener Tiefenausdehnung erschienen.

Worauf dieser individuelle Unterschied beruht, ist nicht ohne weiteres anzugeben; möglich erscheint es, ihn mit dem später noch zu berührenden Umstande in Zusammenhang zu bringen, daß der Konvergenzgrad der Augen für die Entfernung, in

[1] PFLÜGERS Archiv, XC. S. 525. 1902.

welcher wir die Sehobjekte wahrnehmen, doch keineswegs ganz ohne Bedeutung, und daß diese Bedeutung eine individuell sehr verschiedene sein mag. In der Tat ist wahrscheinlich, daß sie bei HELMHOLTZ ungewöhnlich ausgeprägt gewesen ist; und es könnte hiermit zusammenhängen, daß er im Telestereoskop mit genau parallelen Spiegeln (wobei die Konvergenz in demselben Maße vermindert, wie der scheinbare Augenabstand vermehrt wird) eben zufolge dieses Umstandes den Gegenstand auch in der kleinen Entfernung und somit in richtiger Form wahrgenommen hat. Hierfür sprechen einigermaßen die Angaben, die HELMHOLTZ über die Modifikation des Eindruckes durch Drehung der Spiegel macht, die in der Tat bei ihm den Seheindruck in entscheidender Weise modifiziert zu haben scheint. — Möglich wäre indessen wohl auch, daß bei Gegenständen, die hinsichtlich ihrer Form bekannt sind, der Eindruck der Entfernung geradezu durch das Verhältnis der Frontal- und der binokularen Tiefenwerte bestimmt wird. Auch dieses bildet ein Moment der Erscheinungsweise, das mit wechselnden Entfernungen sich regelmäßig ändert; und es könnte daher recht wohl für den Entfernungseindruck unter Umständen bestimmend werden, ganz ebenso wie der Sehwinkel bei Gegenständen von bekannter Größe. Wäre dies der Fall, so würde sich für den Seheindruck eben diejenige Entfernung ergeben, die der Gegenstand tatsächlich haben müßte, um das vorhandene Verhältnis der frontalen Werte zu den binokularen Parallaxen zu ergeben. Gerade in dieser Hinsicht wird nun wiederum das Vorkommen großer individueller Unterschiede nicht überraschen können, und es wäre wohl denkbar (wie auch v. ROHR andeutet), daß sich in der von HELMHOLTZ angegebenen Sehweise eine besondere Sicherheit in der Auffassung gewisser räumlicher Verhältnisse, ein in bestimmten Hinsichten besonders gutes Augenmaß bemerklich machte.

Wenden wir uns einer allgemeineren Betrachtung zu, so ist zunächst klar, daß, wie ein orthomorphes Raumbild, so auch ein orthomorpher Seheindruck nur möglich ist, wenn $\alpha = 1$, dagegen bei einer von 1 verschiedenen Fernrohrvergrößerung allgemein ausgeschlossen ist. Dieses ergibt sich unmittelbar aus der an früherer Stelle schon hervorgehobenen Tatsache, daß die Netzhautbilder, wie sie bei einer von 1 verschiedenen Fernrohrvergrößerung erzeugt werden, bei keinem Konvergenzgrad, also bei keiner Entfernung des Raumbildes ein solches von homöomorpher Beschaffenheit liefern. Da unter der hier gemachten Voraussetzung der Seheindruck mit irgend einem dieser Raumbilder übereinstimmen muß, so ist auch ein orthomorpher Seheindruck unmöglich. Nicht minder läßt sich dagegen den obigen Ausführungen entnehmen, daß bei beliebiger Fernrohrvergrößerung und Basisänderung orthoplastische Seheindrücke möglich sind, und wir können dem Obigen auch die hierfür erforderlichen Bedingungen entnehmen. Der Seheindruck muß diejenige scheinbare Entfernung besitzen, die wir als die orthoplastische bezeichneten und für die wir den Wert $\frac{A}{\delta}$ fanden. Während nun aber dem Raumbild durch eine bestimmte Einrichtung des optischen Instruments ohne weiteres jede beliebige Entfernung, insbesondere auch die orthoplastische oder orthomorphe gegeben werden kann, ist dies für die Seheindrücke nicht der Fall, eben weil für diese, wie erwähnt, die Entfernung nach einer Reihe verschiedenartiger Umstände in komplizierter, ja auch vielfach einer präzisen Angabe sich ganz entziehender Weise bestimmt. Hieraus ergibt sich, daß es ohne eine Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse der einzelnen optischen Instrumente, der Natur der gesehenen Gegenstände usw. nicht möglich ist, aus der Forderung eines homöomorphen oder orthoplastischen Seheindrucks bestimmte Regeln abzuleiten, ja auch nur zu übersehen, ob solche Regeln überhaupt gegeben werden können. Wir sind daher hier an dem Punkt angelangt,

wo wir die Betrachtung spezialisieren, namentlich für die einzelnen Hauptarten optischer Instrumente gesondert weiter führen müssen.

Fassen wir zunächst die binokularen Fernröhre ins Auge, so versteht sich hier von selbst, daß der allgemeine Zweck der Instrumente eine von 1 verschiedene Fernrohrvergrößerung verlangt. Dem Obigen zufolge ist dadurch die Erzeugung homöomorpher Raumbilder oder Seheindrücke ausgeschlossen; möglich ist dagegen eine orthoplastische Erscheinung und wir erhalten für sie die Bedingung, daß S, die scheinbare Entfernung des Gesehenen, $= \frac{A}{\delta}$ ist; der Gegenstand müßte also in einer Entfernung wahrgenommen werden, der sich zu seiner tatsächlichen verhält, wie $1 : \delta$. Dabei würden zugleich seine Abmessungen in einem Maßstabe $\mu = \frac{\alpha}{\delta}$ erscheinen. Um zu beurteilen, ob und unter welchen Umständen wir auf diesen Erfolg rechnen dürfen, können wir von einer einfachen Überlegung ausgehen. Wir sind in erster Linie gewohnt, Gegenstände aus sehr verschiedenen Entfernungen zu sehen. Insbesondere haben wir meist ausgiebige Gelegenheit gehabt, die jeweils durch das Fernrohr gesehenen oder ihnen ähnliche aus geringerem Abstand wahrzunehmen. In gewissem Umfange ist es uns wohl auch geläufig, verkleinerte Nachbildungen derartiger Gebilde zu sehen. Dagegen sind Nachbildungen in vergrößertem Maßstab etwas durchaus Ungewöhnliches. Hiernach ist es verständlich, was ja auch die Erfahrung in bekannter Weise lehrt, daß der optische Erfolg des Fernrohrs nicht darin besteht, daß uns die Gegenstände absolut vergrößert, sondern darin, daß sie uns angenähert erscheinen. Dürfen wir demnach auch hier vermuten, daß wir die Gegenstände nicht absolut vergrößert, sondern höchstens in ihrer wahren Größe sehen, so ergibt sich, daß wir Fehler der Plastik, und zwar Hypoplastik, eine abgeflachte Erscheinung stets erhalten werden, wenn die Bedingung der orthoplastischen Erscheinung auf einen Wert für μ führt, der größer als 1 ist, d. h. $\alpha > \delta$. Dies bestätigt sich in bekannter Weise für das gewöhnliche binokulare Fernrohr ohne Basisvergrößerung. In diesem ist $\delta = 1$, während α natürlich größer als 1, und die hier entstehende abflachende Wirkung ist eine bekannte Erscheinung.[1]

Wenn wir ferner von der Annahme ausgehen, die wenigstens für viele Verhältnisse wohl als die wahrscheinlichste gelten darf, daß die Gegenstände in ihrer natürlichen Größe und dem entsprechend verminderten Abstand gesehen werden, so können wir leicht ableiten, wie das Instrument beschaffen sein muß, um unter dieser Voraussetzung orthoplastische Eindrücke zu liefern. Soll nämlich μ (der Modellmaßstab) $= 1$ werden, so muß, da nach den für die Orthoplastik abgeleiteten Bedingungen $\mu = \frac{\alpha}{\delta}$, die Basisvergrößerung = der Fernrohrvergrößerung sein. Es geht hieraus hervor, daß dieser von Helmholtz besonders hervorgehobene und neuerdings viel besprochene Spezialfall in

[1] Ich möchte betonen, daß die bekannte abflachende Wirkung der gewöhnlichen binokularen Fernrohre sich streng zutreffend nicht verständlich machen läßt, ohne die besonderen physiologischen Verhältnisse des Seheindruckes zu berücksichtigen. Sähen wir, was nach Maßgabe der physikalischen Verhältnisse durchaus möglich wäre, die Gegenstände in ihrer wahren Entfernung und entsprechend vermehrter absoluter Größe, so würden sie uns voraussichtlich auch den Eindruck einer richtigen Plastik machen; es sind nur die besonderen physiologischen Verhältnisse des Sehens, die dieses im allgemeinen ausschließen.

der Tat eine ausgezeichnete Bedeutung besitzt. Die optischen Erfolge stimmen wenigstens in bezug auf die Frontalwerte und binokularen Parallaxen mit denen überein, die durch eine bloße Annäherung des Gegenstandes an den Beobachter ohne Größenänderung bewirkt werden würden. Ein Scheindruck, der den Gegenstand in seiner natürlichen Größe und (in jenem eingeschränkten Sinne) in richtiger Plastik zeigt, ist also möglich. Und da wir erwarten dürfen, daß in großem Umfange die Gegenstände tatsächlich in ihrer natürlichen Größe und der entsprechenden Entfernung wahrgenommen werden, so läßt sich nicht verkennen, daß auch für eine richtige Plastik durch die erwähnte Einrichtung (Fernrohrvergrößerung = Basisvermehrung) die relativ günstigsten Bedingungen geschaffen werden.

Das Ergebnis, zu dem wir hier gelangen, stimmt mit den im Text gegebenen Entwickelungen von HELMHOLTZ insofern überein, als auch wir die Wahl übereinstimmender Werte für die Fernrohrvergrößerung und Vermehrung des Augenabstandes für einen in gewissen Hinsichten ausgezeichneten Fall erklären. Aber es ist (wir müssen hierin v. ROHR[1] durchaus zustimmen) nicht oder wenigstens nicht streng richtig, wenn HELMHOLTZ sagt, daß die Wirkung eines Instrumentes, in dem die Basis das 16 fache des Augenabstandes beträgt und das zugleich 16 fache Vergrößerung besitzt, die nämliche sei, als sähe man das Objekt mit unbewaffneten Augen aus einer 16 fach kleineren Entfernung, als man es wirklich sieht.

Es gilt dies wohl in dem eben dargelegten eingeschränkten Sinne, aber es gilt nicht mit Bezug auf die monokularen Tiefenwerte. Die gesamten perspektivischen Verschiebungen, die bei einer wirklichen Annäherung an den Gegenstand stattfinden würden, lassen sich, wie selbstverständlich, nicht erzielen.

Wenn andererseits v. ROHR sagt, daß der Wahl übereinstimmender Werte für die Vergrößerung und Vermehrung der Augendistanz hinsichtlich der Orthomorphie keinerlei Vorzug zukomme, so kann dem doch nicht ganz zugestimmt werden. Richtig ist freilich, daß auch die hier erzeugten Raumbilder immer porrhalaktische sind und demgemäß auch der Scheindruck in gewissen Hinsichten unrichtig sein wird. Dies schließt jedoch nicht aus, daß die Unrichtigkeiten gerade in diesem Falle von besonders geringem Betrag oder besonders geringer Bedeutung sein können, und dies ist meines Erachtens in der Tat der Fall. — Im Anschlusse hieran sei noch ein anderer Punkt berührt, der, wie ich glaube, einer gewissen Aufklärung bedarf. v. ROHR sagt (a. a. O. S. 87), es sei ein vollkommenes Rätsel, weshalb HELMHOLTZ die musterhaft klare und richtige Darstellung des Telestereoskops (nämlich die ältere in POGGENDORFFS Annalen 102, 1857) nicht in sein Handbuch der physiologischen Optik übernahm. Ich vermag diesem Urteil nicht beizustimmen. Vielmehr kann der Grund, der HELMHOLTZ zu einer veränderten Darstellung bestimmte, mit großer Wahrscheinlichkeit darin gefunden werden, daß er seine Ansicht in einem ganz bestimmten Punkte modifiziert und, wie wir hinzufügen müssen, berichtigt hatte. Auch andere Tatsachen machen es wahrscheinlich, daß HELMHOLTZ in der Zeit, als er das Telestereoskop zuerst beschrieb (1857), die Bedeutung der Augenkonvergenz für die gesehene Entfernung noch zu überschätzen geneigt war.

In der Tat geht die ältere Darstellung von der Annahme aus, daß die Konvergenz der Augen die gesehene Entfernung ohne weiteres bestimme. Es heißt dort (a. a. O. S. 174):

„Während jedes einzelne Fernrohr dem Beobachter den Gegenstand so zeigt, wie er in $1/n$ der Entfernung erscheint, sind doch die Verschiedenheiten der perspektivischen Ansicht beider Augen nicht so groß, wie sie sein würden, wenn der Beob-

[1] Die binokularen Instrumente. Berlin 1907. S. 87.

achter sich dem Gegenstande wirklich bis auf $1/n$ der Entfernung genähert hätte. Durch Verbindung eines Doppelfernrohres mit einem Telestereoskop von parallelen Spiegelpaaren wird dieser Fehler nicht beseitigt.

Es tritt nur eine gleichmäßige weitere Reduktion aller scheinbaren linearen Dimensionen, wie sie das Doppelfernrohr zeigt, ein. Wohl aber kann man für einzelne Gegenstände, die in bestimmter Entfernung stehen, ein richtiges Relief gewinnen, indem man die kleineren Spiegel unter 45° stehen läßt und die großen allein unter einem etwas kleineren Reflexionswinkel als 45° reflektieren läßt. Dadurch gewinnt man . . . im einfachen Telestereoskop allein ohne vergrößernde Gläser ein übertriebenes Relief, und kann dadurch den entgegengesetzten Fehler der Fernrohrverbindung korrigieren."

Diese Darstellung würde dann richtig sein, wenn die Entfernung, in der wir den Gegenstand wahrnehmen, ohne weiteres durch den Konvergenzgrad bestimmt würde.[1] In diesem Falle würde, wie das Telestereoskop ohne Vergrößerung ein verkleinertes aber geometrisch ähnliches Bild von dem mit freiem Auge sichtbaren erzeugt, so auch die Hinzufügung des Telestereoskopes zum binokularen Fernrohr ein verkleinertes Abbild des mit dem gewöhnlichen binokularen Fernrohr (ohne Basisvergrößerung) Sichtbaren erzielen, die Abflachung also unverändert bestehen bleiben. Sicher aber ist jene Voraussetzung nicht erfüllt: die scheinbare Entfernung ist durch den Konvergenzgrad eben nicht zwingend bestimmt. Demgemäß braucht denn auch das abgeflachte Bild, das das gewöhnliche binokulare Fernrohr liefert, durch Einschaltung des Telestereoskopes keineswegs auf geringere scheinbare Entfernung gebracht zu werden (wobei in der Tat das Relief unverändert bleiben würde), sondern es kann sehr wohl in der gleichen Entfernung wie vorher wahrgenommen werden (trotz der Verminderung der Konvergenz), und unter diesen Umständen wird in der Tat der Fehler der Abflachung durch die Basisvergrößerung korrigiert werden.

Die Vergrößerung der Basis ist also durchaus geeignet, den dem gewöhnlichen binokularen Fernrohr eigentümlichen Fehler, die Abflachung, zu beseitigen oder wenigstens zu vermindern; und sie ist es, nicht die Modifikation der Spiegelstellung oder der Konvergenzgrad, worauf es dabei ankommt.

Die spätere Darstellung ist also, insofern sie eine Beseitigung der abflachenden Fernrohrwirkung durch das Telestereoskop für möglich erkärt und dabei die Abweichung der Spiegel von der Parallelstellung als unerheblich beiseite läßt, meines Erachtens gegenüber der älteren berichtigt, und ohne Zweifel wohl auf Grund jener vorhin erwähnten allgemeinen Ansichtsänderung.

Dagegen ist die Ungenauigkeit, die, wie wir sahen, der späteren Darstellung anhaftet, auch in der früheren bereits vorhanden, diejenige nämlich, die sich auf die monokularen Verhältnisse bezieht. In der Tat ist es ja in dieser Hinsicht keineswegs streng richtig, wenn Helmholtz sagt, daß jedes einzelne Fernrohr den Gegenstand so zeigt, wie er in $1/n$ der Entfernung erscheint. Vielmehr bringt die Annäherung auf $1/n$ der Entfernung für ein Auge eine Reihe von Veränderungen in der Anordnung der Gegenstände mit, die bei der Fernrohrvergrößerung fehlt.

Es wird nicht überflüssig sein hier sogleich zu betonen, daß mit diesem Ergebnis keineswegs die Anforderung erhoben werden soll, daß bei der Konstruktion der optischen Instrumente jene Regel eingehalten werden müsse. Einerseits muß hier daran erinnert werden, daß die Voraussetzung, unter der wir hier zunächst die Dinge behandelt haben (einer proportionierten binokularen Tiefenwahrnehmung oder einer bestimmten Beziehung zwischen scheinbarer Entfernung und binokularer Tiefenwahrnehmung), eine bedingte ist, worauf noch zurückzukommen sein wird; andererseits ist die Erzielung einer richtigen Plastik ja nicht das einzige, was in den Konstruktionen berücksichtigt werden muß. Aus technischen Gründen sind wir hinsichtlich

[1] Sie ist, wie man auch sagen kann, wohl für das Raumbild in dem hier festgelegten Sinne, keineswegs aber für den Scheindruck zutreffend.

der Basis weit beschränkter als hinsichtlich der Fernrohrvergrößerung. Indem wir die letztere höher als die erstere steigern, erhalten wir eine beträchtliche scheinbare Annäherung der Gegenstände, die uns mindestens die relative Tiefenanordnung der Teile erkennen läßt, Vorteile, denen gegenüber eine relative Verminderung der Plastik oder eine scheinbare Abflachung in Kauf genommen werden kann.

Für die binokularen Mikroskope liegen die Verhältnisse zunächst insofern anders, als hier das Fortfallen einer Fernrohrvergrößerung (die Bedingung $\alpha = 1$ in unserer obigen Bezeichnung) mit den allgemeinen Zwecken des Instrumentes nicht unvereinbar ist. Denken wir uns ein Mikroskop von der Beschaffenheit konstruiert, daß für das in O_l (oder O_r) befindliche Auge (Fig. 79) die Winkelanordnung aller Objektpunkte genau die nämliche ist, wie für einen dem Objekt sehr nahe gelegenen Punkt o_l (oder o_r), so wird damit jene Bedingung erfüllt sein. Dabei würde das Instrument eine Vergrößerung in dem beim Mikroskop üblichen Sinne von dem Betrage besitzen, in dem die sogenannte deutliche Sehweite den Abstand des Objektes von jenem Punkte O übertrifft. Das Instrument dieser Art würde, wie man kurz sagen kann, nicht nach dem Prinzip des Fernrohres, sondern lediglich nach dem der Lupe vergrößern.[1]

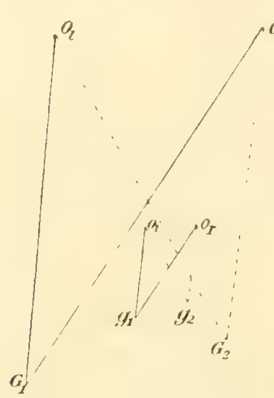


Fig. 79.

Liegt, wie im allgemeinen der Fall ist, der Aufnahmepunkt im Objektiv, so ist die Entfernung des Objekts von ihm annähernd gleich der Fokaldistanz des Objektivs f, und die Vergrößerung $= 250\,\mathrm{Mm}/f$.

Denken wir uns ferner zwei derartige Mikroskope, so angeordnet, daß ihre Austrittspupillen um einen dem Augenabstand (2a) gleichen Betrag voneinander bastehen, während die Distanz der Aufnahmepunkte gleich b ist, so läßt eine Konstruktion und Erwägung, die der oben bezüglich des Telestereoskops durchgeführten vollkommen entspricht, leicht erkennen, daß das Instrument ein geometrisch ähnliches Raumbild liefert, das im Vergleich zu dem realen Objekt im Verhältnis von $b : 2a$ vergrößert ist.

Sind g_1 und g_2 zwei reale Punkte, so erhalten wir ihre Orte im Raumbilde G_1 und G_2 als die Schnittpunkte der Linien, die von O_l und O_r parallel zu $o_l g_1$ und $o_r g_1$ bzw. $o_l g_2$ und $o_r g_2$ gezogen sind.

Für die binokularen Mikroskope bestehen dann aber weiter auch insofern ganz andere Verhältnisse, und zwar einfachere als für die Fernrohre, als wir hier im allgemeinen von der Annahme ausgehen dürfen, daß die Gegenstände in einem annähernd bestimmten Abstande, nämlich der sogen. deutlichen Sehweite, 250 mm, wahrgenommen werden.

Im Hinblick hierauf läßt sich die Bedingung für die Erzielung eines homöomorphen Seheindruckes ohne weiteres angeben. Es muß nämlich die orthomorphe Entfernung gleich der deutlichen Sehweite (250 mm) gemacht werden. Die orthomorphe Entfernung ist nun, wenn wir die Aufnahmeentfernung

[1] Die hier besprochene Anforderung ist die nämliche, die Czapski in der Form ausdrückt, daß die Knotenpunkte des Instrumentes in die Ein- und Austrittspupille fallen müssen (Zeitschr. für Mikroskopie. XIV. 1897).

mit A bezeichnen, $= \frac{A}{\delta}$, und da hier $A = f$, $\delta = \frac{b}{2a}$, so erhalten wir

$$\frac{2a}{b} \cdot f = 250 \text{ mm}.$$

Die Basis muß sich zum Augenabstande verhalten wie die Fokaldistanz zur deutlichen Sehweite.

Ein diesen Anforderungen entsprechendes Instrument ist von den Zeisswerken zufolge einer durch den amerikanischen Zoologen Greenough gegebenen Anregung konstruiert worden.

In bezug auf die spezielleren technischen Verhältnisse sei hier nur folgendes bemerkt. Aus selbstverständlichen Gründen ist es zweckmäßig, denjenigen Punkt, der etwa in der Mitte des Bildes liegen soll, in die Achsen beider Objektive zu bringen. Da er zugleich annähernd in der Fokaldistanz derselben liegen muß, so bestimmt sich durch diese und den Objektivabstand, also durch die mit b und f bezeichneten Werte der Konvergenzwinkel der Objektivachsen. Wären die Instrumente lediglich aus zentrierten Linsen gebildet, so daß der Achsenstrahl ungebrochen durchginge, so wäre hierdurch auch zugleich die Tubuslänge fixiert; sie müßte so groß sein, daß (bei der gegebenen Konvergenz) die Austrittspupillen einen Abstand $= 2a$ (dem Augenabstand) voneinander haben. In diesem Falle würde für den Schnittpunkt der Achsen das Raumbild mit dem Orte des realen Punktes zusammenfallen. In so einfacher Form ist indessen die Konstruktion nicht durchführbar. Vielmehr wird durch die für die Bildaufrichtung benutzten Porroschen Prismen eine Parallelverschiebung eingeführt, die für beide Tuben in verschiedenem Sinne variiert werden kann. Hierdurch ist es ermöglicht (was für den praktischen Gebrauch von großer Wichtigkeit ist), ohne Variierung der Tubuslänge den Abstand der Okulare innerhalb gewisser Grenzen zu modifizieren und dem Augenabstand des Beobachters anzupassen.

Was die spezielle optische Konstruktion anlangt, insbesondere die Bildaufrichtung und die Erfüllung der Bedingung, daß das Instrument keine Fernrohrvergrößerung besitzt, so muß hier auf die von den Konstruktoren gegebenen Beschreibungen des Instruments verwiesen werden.[1]

Bei Einhaltung der soeben entwickelten Regeln ist die Vergrößerung $= \frac{2a}{b}$ oder $= \frac{250 \text{ mm}}{f}$. Ihr ist im allgemeinen dadurch eine ziemlich niedrige Grenze gesteckt, daß die Basis, der Abstand der mikroskopischen Objektive, aus technischen Gründen nicht unter einen gewissen Wert verkleinert werden kann. Es darf aus diesem Grunde nicht unerwähnt bleiben, daß die Einführung einer Fernrohrvergrößerung (durch stärkere Okulare) die Erzeugung stärker vergrößerter und zwar nicht homöomorpher, aber doch orthoplastischer Scheindrücke ermöglichen würde. Die Konstruktionsbedingungen würden hierbei insofern unverändert bleiben, als die orthoplastische Entfernung gleich der deutlichen Sehweite, 250 mm, zu machen wären und auch sie, wie früher gezeigt $= \frac{2a}{b} \cdot f$ ist.

Auch in diesem Falle muß also $250 \text{ mm} = \frac{2a}{b} \cdot f$ sein, die Fokaldistanz der Objektive sich zu 250 mm verhalten wie die Basis zum Augenabstande, woraus sich

[1] Czapski u. Gebhardt, Zeitschr. für Mikroskopie. XIV. 1897.

dann ebenso, wie vorher, bestimmte Grenzen wie für die Basis so auch für die Fokaldistanz ergeben. Durch die Einführung der Fernrohrvergrößerung wäre aber die Erzielung einer stärkeren Vergrößerung ermöglicht, da diese hier $= \alpha \cdot \frac{2a}{b}$ ist. Wenn die orthoplastische Beschaffenheit des Seheindrucks als ein relativ befriedigender Ersatz des homöomorphen gelten darf, so wird wohl zu erwägen sein, ob wirklich im Interesse der strengen Homöomorphie auf die höheren Vergrößerungen verzichtet werden muß, oder nicht die Erzeugung stärker vergrößerter orthoplastischer Eindrücke auch als ein unter Umständen ratsames Verfahren angesehen werden darf.

Was die Herstellung und Betrachtung stereoskopischer Photographien anlangt, so ist hier, wie oben schon gezeigt wurde, die Fernrohrvergrößerung $= \frac{P}{B}$, wenn wir mit P den Abstand der photographischen Platte vom Objektiv, mit B die Betrachtungsweite bezeichnen. Ist ferner die Aufnahmebasis das δ-fache des Augenabstandes, also $= \delta \cdot 2a$, A die Entfernung eines Objektes von dem photographischen Objektiv und S die scheinbare Entfernung des Seheindruckes, so ist dem Obigen zufolge die Bedingung für das Entstehen eines homöomorphen sowohl wie eines orthoplastischen Seheindruckes, daß $S = \frac{A}{\delta}$. Und zwar ist bei Erfüllung dieser Bedingung der Seheindruck homöomorph und, wenn $P = B$ ist, im Maßstabe $\frac{1}{\delta}$, wenn dagegen P von B verschieden ist, der Eindruck orthoplastisch und im Maßstabe $\frac{P}{B} \cdot \frac{1}{\delta}$.

Es wird sich fragen, welche Regeln für die Aufnahme und Betrachtung stereoskopischer Photographien hieraus abgeleitet werden können. In dieser Hinsicht darf zuerst bemerkt werden, daß hier, ebenso wie beim Mikroskop, und abweichend vom Fernrohr, die Erzielung eines nicht nur orthoplastischen, sondern homöomorphen Eindruckes, die Gleichheit von Plattenabstand und Betrachtungsweite, im allgemeinen realisierbar ist. Wir wollen daher für das Folgende die Einhaltung dieser Regel zunächst voraussetzen und erst zum Schluß darauf zurückkommen, aus welchen Gründen sich etwa Abweichungen davon empfehlen können und welche Folgen sich daran knüpfen. Ferner können wir sogleich auch bemerken, daß, wenn wir Plattenabstand und Betrachtungsweite übereinstimmend ändern, die Netzhautbilder die gleichen bleiben. Es wird daher für den Erfolg ohne Belang und von wesentlich technischer Bedeutung sein, ob wir Plattenabstand und Betrachtungsweite groß oder klein nehmen, solange nur beide übereinstimmend erhalten werden. Endlich können wir bemerken, daß die Aufnahmeentfernung A sich dadurch bestimmt, daß wir bestimmte Objekte oder Objektteile zu einem einheitlichen Bilde vereinigt haben wollen. Da sie überdies im allgemeinen einen bestimmten Winkelbereich jedenfalls nicht überschreiten, aber auch annähernd ausfüllen müssen, so werden wir uns die Aufnahmeentfernung als durch diese, einer allgemeinen Fixierung selbstverständlich entzogenen Verhältnisse bestimmt denken können. Ist nun dies der Fall, so bleibt als Hauptfrage für die Herstellung der photographischen Aufnahmen die der Aufnahmebasis, und diese ist es auch, die in den letzten Jahren am häufigsten und eingehendsten erörtert worden ist. Prüft man, welche Regeln sich für diese aus den obigen Aufstellungen ergeben, so findet man, daß sich aus ihnen eine ganz feste Vorschrift

zunächst dann ableiten läßt, wenn wir für S, die scheinbare Entfernung des Seheindruckes, einen bestimmten Wert als ein für allemal gegeben, voraussetzen. Wir erhalten dann $\delta = \frac{A}{S}$.

Soweit wir von der Annahme ausgehen dürfen, daß die scheinbare Entfernung des im Stereoskop gesehenen eine ganz bestimmte ein für allemal feste ist, muß die Aufnahmebasis zum Augenabstand in demselben Verhältnis stehen, wie die Aufnahmeentfernung zu jener fixierten Sehweite, sie muß also der Aufnahmeentfernung proportional vermehrt werden.

Diese Bedingung dürfte mit einer gewissen Annäherung wohl für gewisse Klassen von Objekten, insbesondere für mikroskopische Präparate zutreffen. In der Tat darf man wohl vermuten, daß die Gewöhnung, solche in der sogen. deutlichen Sehweite zu sehen, uns veranlassen wird, das im Stereoskop erscheinende Modell gleichfalls etwa in diesem Abstand zu lokalisieren. Unter dieser Voraussetzung erhalten wir

$$\delta = \frac{A}{250\,\text{mm}}.$$

Ist die Aufnahmeentfernung annähernd $= f$, der Fokaldistanz des mikrophotographischen Objektivs zu setzen, so ergibt sich die Regel, daß der Abstand der beiden Aufnahmepunkte b sich zum Augenabstand $2a$ verhält, wie jene Fokaldistanz zur Sehweite, 250 mm

$$b = \frac{f}{250\,\text{mm}} \cdot 2a.$$

Freilich darf man wohl nicht außer Acht lassen, daß die Annahme, von der hier ausgegangen ist, die Wahrnehmung des Gegenstandes in einem Abstande von 250 mm, selbst hier schon einigermaßen problematisch ist. Denn bei der Betrachtung im Stereoskop sind die Bedingungen und Wahrnehmungsgewöhnung doch erheblich andere als beim Mikroskopieren, und es wird daher kaum auszuschließen sein, daß der Beobachter das Modell in einer anderen, namentlich in einer größeren Entfernung als 250 mm wahrnimmt, und somit, wenn die Bedingungen für diesen Abstand richtig bestimmt sind, in einer falschen Plastik, mit übertriebener Tiefe. Vielfach ist auch die scheinbare Entfernung des stereoskopisch gesehenen Gebildes höher, mit 350 mm angesetzt worden.

Ganz anders liegen dagegen die Verhältnisse für alle die mannigfachen Gebilde, die zumeist den Gegenstand stereoskopischer Darstellungen bilden, Landschaften, Architekturen, Menschen und Tiere, Skulpturen usw. Die Erfahrung lehrt hier vor allem, daß die scheinbare Entfernung der im Stereoskop gesehenen Gebilde eine ungemein verschiedene sein kann. Erwägt man, worauf dieses beruht und wovon die Entfernungen abhängen können, so läßt sich vermuten, daß ähnlich, wie es bereits oben angedeutet wurde, bei Gegenständen bekannter Form eben diese Kenntnis den Entfernungseindruck mitbestimmen wird, und zwar so, daß der Eindruck einer etwa richtigen Form, kein hyper- oder hypoplastischer entsteht. In der Tat sehen wir bei einer, die Augendistanz erheblich übertreffenden Aufnahmebasis verkleinerte Modelle von annähernd richtiger Form. Bei gut bekannten Gegenständen würde demgemäß die Forderung der Orthomorphie einen mehr oder weniger weiten Spielraum für die Aufnahme-

basis zulassen, indem sozusagen von selbst die scheinbare Entfernung des gesehenen Gebildes sich auf den Wert der Orthomorphie einstellen wird. Unter dieser Voraussetzung ergäbe sich also die Forderung, die Aufnahmebasis dem Augenabstande gleich zu machen, wenn wir den Eindruck der Gegenstände in ihrer natürlichen Größe erzeugen wollen, dagegen eine größere Basis zu wählen, wenn wir den Eindruck verkleinerter Modelle anstreben, wobei eine Vergrößerung der Basis auf das δfache des Augenabstandes einem im Verhältnis $\delta:1$ verkleinerten Modell entsprechen würde. Ob das eine oder das andere sich empfiehlt, wird alsdann nach anderen Gesichtspunkten, als dem der Orthomorphie zu beurteilen sein; wir kommen darauf unten zurück.

Auf der anderen Seite finden wir sozusagen als entgegengesetztes Extrem, daß bei Gegenständen ganz unbekannter Form die scheinbare Entfernung des Seheindruckes sich einer sicheren Bestimmung ganz entzieht und daher, wie wir auch die Aufnahmebasis wählen, die Orthomorphie durchaus problematisch bleiben wird. Dies gilt z. B. für die Aufnahme rein landschaftlicher Gebilde, Berge und Felsen usw. Bei stereoskopischer Vereinigung von Aufnahmen, die aus sehr weit voneinander entfernten Punkten gemacht sind, erhalten wir hier, wie bereits im Text erwähnt, in sehr schöner und frappanter Weise den Eindruck eines kleinen, nahen Modells. In welcher Entfernung und Größe aber ein solches gesehen wird, entzieht sich jeder Bestimmung; und es wird daher stets die Möglichkeit gegeben sein, daß es in einer anderen als der orthomorphen Entfernung, und demgemäß auch in falscher Plastik, mit zu großen oder zu kleinen Tiefenwerten gesehen wird.

Über die erst erwähnten für die Orthomorphie einen gewissen Spielraum gestattenden Verhältnisse mögen hier noch einige Bemerkungen hinzugefügt werden. Es ist zunächst zu beachten, daß jener Spielraum insofern immer ein beschränkter ist, als für die Entfernungen, in denen ein Seheindruck überhaupt erscheinen kann, gewisse Grenzen gesetzt sind. In erster Linie werden wir hier die sogenannte deutliche Sehweite als untere Grenze betrachten dürfen. Unsere allgemeinen Sehgewöhnungen bringen es mit sich, daß wir selten Gegenstände in kleineren Abständen als 250 mm betrachten. Wählen wir Aufnahmeentfernung und Aufnahmebasis so, daß die orthomorphe Entfernung unter diesen Wert heruntergeht, so wird zu erwarten sein, daß die Gegenstände eben nicht in diesem Abstand, sondern entfernter und mit übertriebenen Tiefen gesehen werden. Hierin liegt der Grund der frappanten hyperplastischen Entstellungen, die man erhält, wenn man nahe Gegenstände im Telestereoskop betrachtet. Praktisch von noch größerer Bedeutung ist dann wohl die Tatsache, daß wenigstens sehr häufig für die scheinbare Entfernung des im Stereoskop Gesehenen auch eine obere Grenze bestehen wird. Wir müssen nämlich beachten, daß im Stereoskop die Verhältnisse insofern eigenartig und ganz anders, als z. B. beim binokularen Fernrohr liegen, als tatsächlich, wie auch der Beschauer sehr wohl weiß, die realen Gegenstände nicht vorhanden sind, sondern künstlich hergestellte Nachbildungen betrachtet werden. Dazu kommt, daß selbst bei sehr guten Bildern und völliger Treue in den Formen schon das Fehlen der Farben, Verhältnisse der Beleuchtung, häufig der Mangel von Bewegung u. a. dem Eindruck eines Sehens der wirklichen Gegenstände hindernd entgegenstehen. Demgemäß muß man wohl sagen, daß nur selten im Beschauer ein Erfolg hervorgerufen wird, den man als eine wirkliche Illusion bezeichnen könnte,

während mindestens sehr häufig der Eindruck doch der ist, daß man eine modellartige Nachbildung vor sich hat. Überall nun, wo dies der Fall ist, wird der Eindruck sehr großer Entfernung nicht wohl entstehen können. Kommen daher unter den Aufnahmeobjekten solche vor, die in sehr großem Abstand liegen und deren scheinbare Entfernung selbst in einem verkleinerten Modell behufs richtiger Plastik eine sehr große sein müßte, so wird auch hier die Wahrnehmung in dieser geforderten Entfernung nicht stattfinden, vielmehr die gesehene Entfernung eine zu kleine und die Plastik eine verminderte sein. So erhält man in der Tat häufig bei der stereoskopischen Betrachtung von Landschaften den Eindruck eines abgeflachten, wie auf einer Kulisse gemalten Hintergrundes.

Wir kommen hier schließlich noch auf die Frage zurück, wonach sich die Wahl der Basis richten soll, wenn die Orthomorphie uns einen mehr oder weniger weiten Spielraum gestattet.

In dieser Hinsicht ist zunächst eine wohl verbreitete, aber wie mir scheint, doch ohne Zweifel zu enge Auffassung von den Aufgaben der Stereoskopie zu erwähnen, die dahin geht, daß unter allen Umständen eine vollkommen „naturgetreue" Erscheinung anzustreben sei. Diese Forderung läuft darauf hinaus, daß die Gegenstände in ihrer natürlichen Größe erscheinen sollen, also in unserer obigen Bezeichnung $\mu = 1$, woraus sich denn auch $\delta = 1$ ergibt, die Aufnahmebasis also dem Augenabstande gleich zu machen ist.

So einleuchtend diese Forderung auf den ersten Blick erscheinen mag, so erweist sich bei genauerer Prüfung ihre Berechtigung doch als eine jedenfalls beschränkte. Sie mag als zutreffend da gelten, wo wir ohne weiteres die Erzielung einer möglichst lebendigen Illusion als das anzustrebende Ziel betrachten dürfen. Mag nun dies auch häufig der Fall sein, ganz sicher trifft es doch nicht überall zu. Und man sollte daher, wie mir scheint, den Wert solcher Darstellungen, die den Eindruck verkleinerter Modelle geben, nicht unterschätzen.

Daß solche für wissenschaftliche und Unterrichtszwecke ungemein nützlich sein können, ist von jeher anerkannt worden und bedarf keiner besonderen Erläuterung. Es scheint mir aber nicht gerechtfertigt, ihren Wert als einen notwendig rein intellektuellen zu betrachten; vielmehr ist ihnen ein Wert auch unter ästhetischem Gesichtspunkt wohl nicht ohne weiteres abzusprechen. Wenn das verkleinerte Modell uns ermöglicht, die ganze räumliche Form größerer Gebilde in ganz anderer Weise wahrzunehmen und aufzufassen, als es bei der Betrachtung des Gegenstandes selbst möglich ist, insbesondere mit dem Überblicken eines großen Teiles eine richtige Wahrnehmung der Tiefen zu verknüpfen, so erscheint es mindestens sehr denkbar, daß es in vielen Fällen auch reiz- und eindrucksvoller ist als die Darstellung in Naturgröße.

Ich denke hier namentlich an Architekturen (sowohl Außen- als Innendarstellungen), aber auch an plastische Kunstwerke. Rücksichten solcher Natur werden noch um so mehr ins Gewicht fallen, wenn die Erzielung einer wirklichen Illusion ohnehin aus anderen Gründen ausgeschlossen ist, was, wie vorher schon bemerkt, sehr häufig der Fall sein wird. Über Gebiet und Umfang, in dem Vergrößerung der Basis ratsam ist, läßt sich daher auf Grund einfacher physikalischer oder physiologischer Erwägungen ebensowenig urteilen, wie etwa über Wert und Berechtigung von unterlebensgroßen Porträts. Nur ausgedehnte Erfahrung und ein vielleicht erst durch eine solche sich entwickelnder und ausbildender Geschmack kann hier in letzter Instanz entscheiden.

Wir hatten die Betrachtung bisher auf solche stereoskopische Einrichtungen beschränkt, die durch Ausschluß einer Fernrohrvergrößerung die Erzielung streng homöomorpher Scheindrücke ermöglichen. Es ist, wie vorhin bemerkt, geboten, noch darauf einzugehen, ob und unter welchen Umständen es sich etwa empfehlen kann, uns mit der Forderung orthoplastischer Scheindrücke zu begnügen und wie sich hierdurch die Regeln für stereoskopische Aufnahme und Betrachtung ändern.

Wenn wir durch Wahl einer Betrachtungsweite, die kleiner ist als der Plattenabstand, eine Fernrohrvergrößerung α einführen, so ist (unter den hier immer gemachten Voraussetzungen) der Erfolg der, daß statt eines ähnlichen Modelles vom Maßstabe $\frac{1}{\delta}$ ein orthoplastisches Gebilde gesehen wird, dessen frontale und Tiefenabmessungen $\frac{\alpha}{\delta}$ sind. Hiermit kann unzweifelhaft ein Vorteil verbunden sein, wie er überhaupt der Vermehrung der scheinbaren Größe entspricht; es werden feinere Details erkennbar werden, die Grenze der Unterscheidbarkeit hinausgerückt sein usw. Um jedoch den Wert eines solchen Verfahrens richtig zu beurteilen, muß man erwägen, daß im allgemeinen ja kein Hindernis im Wege steht, auch ein streng homöomorphes Modell vom Maßstabe $\frac{\alpha}{\delta}$ zur Erscheinung zu bringen. Hierzu ist nur erforderlich die Aufnahmeentfernung und zugleich die Basis im Verhältnis $\alpha:1$ zu verringern. Die orthomorphe Entfernung bleibt dabei unverändert; der Modellmaßstab des Scheindruckes wird im Verhältnis $1:\alpha$ vermehrt.

Sofern wir also über alle Verfahrungsweisen in jeder Hinsicht frei verfügen, wird kein Grund vorhanden sein, von den Bedingungen der Orthomorphie abzuweichen.

Hierzu kommt dann noch einiges Weitere. Die richtige Erscheinung der stereoskopischen Gebilde kann, wie wir sahen, überhaupt nicht mit voller Sicherheit erzwungen oder garantiert werden; vielmehr betonten wir, daß bei einer großen Anzahl von Objekten eine gewisse Kenntnis derselben für eine Wahrnehmung in richtiger Entfernung und demzufolge auch sonst in richtiger Form von Bedeutung ist. Es darf wohl vermutet werden, daß diese Momente bei der vollen Naturtreue sicherer und stärker ins Gewicht fallen, als bei der nur bedingten der Orthoplastik, daß also orthomorphe Eindrücke mit größerer Sicherheit erzielt werden können als orthoplastische.

Vor allem jedoch ist hier an die einschränkende Voraussetzung zu erinnern, unter der wir Möglichkeit und Bedeutung einer orthoplastischen Erscheinung abgeleitet hatten. Sie bestand darin, daß wir die Betrachtung lediglich auf Gegenstände erstreckten, deren Abmessungen im Vergleich zu ihrer Entfernung sehr gering sind. Wenn für binokulare Fernrohre und Mikroskope eine solche Betrachtung als zulässig angesehen werden darf, so umfassen stereoskopische Aufnahmen ja meist sehr beträchtliche Winkelwerte und sie erstrecken sich auch auf Gegenstände sehr verschiedener Entfernungen, so daß der Gesamtheit des Dargestellten eine sehr große Tiefenerstreckung zukommt. Nun sind, wie unmittelbar ersichtlich, die beiden hier gestellten Forderungen, daß die scheinbare Entfernung die orthoplastische, $\frac{1}{\delta}$ der wahren, und daß

die Tiefenerstreckungen im Maßstabe $\frac{\alpha}{\delta}$ gesehen werden, nicht allgemein miteinander vereinbar. Sie sind es wohl annähernd für Gegenstände von sehr geringer Tiefendimension. Hier kann die Tiefenerstreckung im Maßstabe $\frac{\alpha}{\delta}$ und gleichwohl der Gegenstand in toto annähernd in $\frac{1}{\delta}$ seiner wahren Entfernung gesehen werden. Anders bei Gegenständen größerer Tiefenausdehnung. Würde hier ein Punkt in der orthoplastischen Entfernung $\left(\frac{1}{\delta}\right.$ seiner wahren$\left.\right)$ gesehen, der Abstand eines anderen von ihm im Maßstabe $\frac{\alpha}{\delta}$, so wird die scheinbare Entfernung dieses letzteren nun nicht die orthoplastische sein, sondern von ihr merklich differieren. Es ergibt sich hieraus, daß, sobald Plattenabstand und Betrachtungsweite verschieden sind, eine Wahrnehmung, die überall die richtigen Verhältnisse zwischen frontalen und Tiefenerstreckungen besäße, wenigstens unter der hier immer gemachten Voraussetzung einer proportionierten Tiefenwahrnehmung unmöglich ist. Es wird also zu erwarten sein, daß jene Beziehung nur teilweise verwirklicht ist, in anderen Teilen dagegen Abweichungen davon eintreten, oder auch daß die Wahrnehmung eine wechselnde ist, ein Punkt z. B., wenn er fixiert wird, in anderem Abstande erscheint als er zuvor (indirekt gesehen bei Fixation eines anderen) erschienen war usw.[1]

Es versteht sich hiernach, daß überall da, wo in planvoller Weise die Aufnahme stereoskopischer Photographien und die Herstellung der Betrachtungsapparate Hand in Hand geht, man sich an die Bedingungen der Orthomorphie halten, d. h. die Betrachtungsweite dem Plattenabstand gleich machen sollte. Abweichungen hiervon werden nur da in Frage kommen, wo wir aus irgendwelchen Gründen in der Wahl der Aufnahmeentfernungen beschränkt, z. B. auf große Entfernungen angewiesen sind. In Fällen dieser Art wird die Wahl schwächerer Objektive und somit eines Plattenabstandes, der größer ist als die Betrachtungsweite, die einzige Möglichkeit sein, die Gegenstände im Stereoskop unter relativ großen Gesichtswinkeln erscheinen zu lassen und es ist denkbar, daß der hiermit gegebene Vorteil groß genug ist, um den Verzicht auf die strenge Homöomorphie aufzuwiegen.

Anders liegen die Dinge ferner, wenn bestimmte photographische Aufnahmen gegeben sind, und nur die Frage gestellt wird, wie die Betrachtung derselben einzurichten ist. Hier ist natürlich nicht zu verkennen, daß durch die Wahl wechselnder Betrachtungsweiten eine größere Mannigfaltigkeit der Erscheinungsweisen erzielt werden kann, und daß es namentlich gelingt, durch die Wahl einer kleinen Betrachtungsweite die Gegenstände verhältnismäßig größer erscheinen zu lassen. Ob der hiermit verknüpfte Nachteil, daß wir nicht mehr auf streng homöomorphe, sondern höchstens auf orthoplastische Eindrücke rechnen können, bedeutend genug ist, um ein solches Verfahren überhaupt unratsam oder verwerflich erscheinen zu lassen, mag dahingestellt bleiben.

[1] In welcher Art und in welchem Maße solche theoretisch zu erwartenden Störungen tatsächlich bemerkbar werden, ist allerdings schwer zu beurteilen, dürfte auch von der besonderen Natur der Gegenstände und von der Individualität des Beobachters in hohem Grade abhängen. Wir kommen auf diese Verhältnisse unten noch zurück.

Die Frage, wie Photographien für stereoskopische Betrachtung hergestellt werden sollen, ist in neuerer Zeit vielfach erörtert worden. Die allgemeine Bedingung der Orthomorphie, daß die Betrachtungsweite gleich dem Plattenabstand sein soll, ist namentlich von physikalischer Seite ins Licht gestellt worden. Im übrigen ist der ganze Gegenstand in gewisser Weise dadurch verdunkelt worden, daß in betreff der zu stellenden Aufgabe von verschiedenen Anschauungen ausgegangen wurde, indem einerseits die Erzeugung eines den realen Gegenständen kongruenten, andererseits aber nur die eines ihnen geometrisch ähnlichen Seheindruckes als Ziel ins Auge gefaßt wurde. So ist namentlich auch der Ausdruck Orthostereoskopie sowohl im einen wie im anderen Sinne gebraucht worden, was die Quelle mancher Mißverständnisse geworden ist.

Ich erwähne zunächst Stolze[1] als Hauptvertreter der wohl viel verbreiteten und allerdings ja einigermaßen nahegelegten Ansicht, daß die Aufgabe der Stereoskoptechnik einfach und ausschließlich darin bestehen soll, einen Ersatz für die freiäugige Betrachtung der Gegenstände selbst zu schaffen, und daß dies erreicht wird, indem die nämlichen Netzhautbilder erzeugt werden, die wir bei der freiäugigen Betrachtung der realen Gegenstände erhalten (ein Prinzip, aus dem die Festhaltung einer dem Augenabstand gleichen Basis sich als allgemeine Regel ergibt). Wie aus dem Obigen hervorgeht, ist diese Auffassung zunächst wohl insofern eine etwas einseitige, als sie den Wert und Nutzen solcher Darstellungen, die dem Betrachte rein verkleinertes Modell erscheinen lassen, nicht richtig veranschlagt. Sie ist aber auch insofern unzutreffend, als sie die verwickelten physiologischen Bedingungen des Seheindruckes glaubt außer Acht lassen zu können. Stolze geht von der Ansicht aus, daß es genüge, die Netzhautbilder mit den von den realen Gegenständen selbst erzeugten übereinstimmend zu machen, um nun auch mit Sicherheit den gleichen Seheindruck zu erzielen. Demgegenüber muß betont werden, daß eine absolute Übereinstimmung bezüglich Farbe, Beleuchtung usw. ja selbstverständlich fast nie erzielt werden kann. Die streng erreichbare Übereinstimmung hinsichtlich der Zeichnung und ihrer räumlichen Verhältnisse ist aber für den physiologischen Erfolg nicht allein bestimmend. Dieser hängt vielmehr von sehr mannigfachen Verhältnissen ab, die zunächst den Entfernungseindruck und hiermit indirekt auch die sonstige Erscheinungsweise des im Stereoskop Gesehenen beeinflussen; und es sind in dieser Hinsicht gerade diejenigen Eigentümlichkeiten von Bedeutung, bezüglich deren wir eine Übereinstimmung der photographischen Bilder mit den wirklichen Gegenständen nicht erzielen können. Zieht man diese Verhältnisse in Betracht, so sieht man, daß es nicht angeht, die physiologischen Bedingungen des Entfernungseindruckes ganz unberücksichtigt zu lassen, und daß auch aus diesem Grunde die Wahl der Aufnahmebasis nicht durch eine ganz einfache und allgemeine Regel festgelegt werden kann.

Abweichend hiervon haben zahlreiche andere Autoren die Bedingungen dafür zu ermitteln gesucht, daß im Stereoskop der Eindruck eines den Vorbildern geometrisch ähnlichen (weder hyper- noch hypoplastischen) Modells erzeugt wird. Ausgehend von einer, unserer obigen ganz ähnlichen Betrachtung, hat Heine[2] in zutreffender Weise hervorgehoben, daß der Eindruck der Plastik in entscheidender Weise davon abhängt, in welcher absoluten Entfernung der Gegenstand bei der stereoskopischen Betrachtung erscheint. Er hat ferner, vollkommen richtig, die Regel aufgestellt, daß (eine bestimmte stereoskopische Sehweite vorausgesetzt), die Basis der photographischen Aufnahme zum Augenabstand in demselben Verhältnis stehen muß, wie der Abstand des Gegenstandes vom photographischen Apparat zu jener scheinbaren Entfernung. Auch konnte er zeigen, daß bei Einhaltung dieser Bedingungen eine Reihe von Gegenständen sehr verschiedener Größe und Entfernung in richtiger Plastik gesehen würde. Dabei waren freilich die Bedingungen besonders günstig auch in der Hin-

[1] Die Stereoskopie und das Stereoskop. 2. Aufl. Halle 1908.

[2] Archiv f. Ophth. LIII. S. 306. 1902.

sicht gewählt worden, daß die Modelle in jener bestimmten Entfernung (350 mm) erschienen. Und wir werden betonen müssen, was die HEINEsche Darstellung vielleicht nicht deutlich genug hervortreten läßt, daß der bestimmte Wert von 350 mm als scheinbare Entfernung des im Stereoskop gesehenen sich niemals streng garantieren, insbesondere auch durch die Fixierung eines Konvergenzwinkels von 11° bei der Betrachtung in keiner Weise sicherstellen läßt. Daß bei Landschaften und dergl. die scheinbare Entfernung des stereoskopischen Seheindruckes eine ungemein verschiedene sein kann, und daß daher hier für die Wahl der Basis keine allgemeinen Regeln aufgestellt werden können, hat HEINE gleichfalls in einer meines Erachtens durchaus zutreffenden Weise dargelegt. Dagegen beruht der von KOTHE[1] gegen die HEINEsche Regel erhobene Einwand auf dem vorher schon berührten Mißverständnis. Dieser sagt: „Wenn dieses Verfahren richtig wäre, dann müßten die beiden Halbbilder gleich sein den Umkehrungen der Netzhautbilder, wie sie bei . . . . Betrachtung des Gegenstandes entstehen würden, d. h. die stereoskopische Photographie müßte dasselbe Netzhautbild liefern, wie der reale Gegenstand selbst.“ Diese Forderung, die KOTHE als „oberstes Gesetz der Orthostereoskopie“ bezeichnet, ist jedoch nur dann gerechtfertigt, wenn wir einen, dem Vorbild kongruenten Eindruck erzielen wollen. Die Aufgabe, die HEINE im Auge hat, ist aber die, den Eindruck eines geometrisch ähnlichen Modells hervorzubringen. Unter den von ihm angegebenen Bedingungen liefern die Photographien in der Tat die gleichen Netzhautbilder, wie ein aus bestimmter Entfernung betrachtetes Modell dieser Art.

Daß die von ELSCHNIG[2] beobachteten Täuschungen, das Überplastisch-Erscheinen von Kugeln, auf den besonderen bei runden Gegenständen bestehenden Verhältnissen der sichtbaren Umrisse beruhen, ist bereits an früherer Stelle erwähnt worden, und es ist daher nicht notwendig, auf die von ELSCHNIG selbst und von verschiedenen anderen Autoren für die Erscheinung versuchten Erklärungen hier einzugehen.

Wir haben die obige Darstellung noch in einigen Hinsichten zu ergänzen und namentlich noch auf einige zunächst offengelassene Punkte zurückzukommen. In erster Linie sind hier die Gründe darzulegen, die uns berechtigen, diejenigen Seheindrücke, die wir orthoplastische nannten, als einen wenn auch natürlich nicht völlig gleichwertigen doch relativ besten Ersatz der orthomorphen anzusehen, der daher anzustreben sein wird, wo jene nicht erreichbar sind. Wie erinnerlich, stimmt das orthoplastische Gebilde mit dem orthomorphen in bezug auf das Verhältnis der Frontalwerte zu den binokularen Tiefenwerten überein, während es sich in bezug auf die monokularen Tiefenwerte von ihm unterscheidet. Die Bedeutung einer solchen Abweichung läßt sich nun wohl in gewisser Weise übersehen. Wie vorhin schon bemerkt, würden unter diesen Umständen die Punkte innerhalb einer der Frontalebene parallelen Schicht annähernd richtig angeordnet sein, ebenso auch die Tiefenlage aller Punkte nahezu die richtige, während dagegen die Winkelabstände zweier verschiedenen Tiefen angehöriger Punkte um endliche Beträge unrichtig sein würde. Hierdurch würde also die perspektivische Anordnung der verschiedenen Tiefen angehörigen Punkte und insbesondere auch die Richtung in die Tiefe verlaufender Linien modifiziert sein, solche z. B., die in Wirklichkeit genau sagittal sind, von der sagittalen Richtung etwas abgewichen erscheinen usw. Mir scheint, daß derartige Formänderungen, abgesehen vielleicht von dem Fall geometrisch regelmäßiger Gebilde (wie Parallelopipede) doch einen relativ geringfügigen Übelstand darstellen, einen geringeren jedenfalls als die Ver-

[1] Zeitschrift für wissensch. Photographie. I. S. 319. 1903.
[2] Archiv f. Ophth. LII. S. 294. 1901.

änderung des Verhältnisses zwischen Frontal- und Tiefenerstreckungen, die wir als Abflachung oder Überplastik bezeichnen. Daß wir im allgemeinen wenig von solchen Änderungen bemerken, geht z. B. daraus hervor, daß wir gewohnt sind, bildliche Darstellungen körperlicher Gegenstände aus ganz verschiedenen Entfernungen zu betrachten, ohne sonderlich darauf zu achten, daß das Bild nur aus einer ganz bestimmten Entfernung wirklich so aussieht, wie der dargestellte körperliche Gegenstand erscheinen könnte. Auch bei einäugiger Fernrohrbetrachtung erscheinen uns die Gegenstände angenähert, ohne daß im allgemeinen das Fehlen derjenigen perspektivischen Änderungen störend würde, die eine wirkliche Annäherung begleiten müßten. Obwohl also diese Störungen sich nicht in irgendeinem strengen Sinn bewerten lassen, so kann man, wie ich glaube, doch davon ausgehen, daß sie in den meisten Fällen von relativ geringer Bedeutung und insbesondere keinesfalls so augenfällig sein werden, wie sie durch ein unrichtiges Verhältnis der Tiefen- zu den Frontalwerten entstehen, und wie sie als Abflachungen bzw. Reliefübertreibungen vorzugsweise bemerkt worden sind. Natürlich wird ihre Bedeutung von der besonderen Natur der gesehenen Gegenstände, vielleicht auch von individuellen Eigentümlichkeiten der Beobachter abhängen.

Eine gewisse Ergänzung fordern sodann die obigen Darlegungen insofern, als wir die Konvergenz der Augen, mit der bei verschiedenen optischen Instrumenten die Betrachtung stattfindet, zunächst ganz außer Betracht gelassen haben.

Dies ist insofern berechtigt, als ja die scheinbare Entfernung eines binokular fixierten Punktes jedenfalls nicht ohne weiteres durch den Konvergenzgrad der Augen sich bestimmt. Damit ist nun nicht gesagt, daß der Konvergenzgrad völlig belanglos sei. Und in der Tat ist dies ja auch nicht der Fall; wir haben vielmehr Anlaß anzunehmen, daß er unter Umständen wohl eine gewisse, allerdings schwer fixierbare und auch individuell stark variierende Bedeutung für die Entfernungswahrnehmung besitze. Es wird demgemäß, wenn auch nicht gerade geboten, immerhin empfehlenswert sein, bei der Einrichtung der optischen Instrumente so zu verfahren, daß das Sehen der Gegenstände in eben derjenigen scheinbaren Entfernung, in der sie behufs richtiger Plastik gesehen werden sollen, durch einen entsprechenden Konvergenzgrad unterstützt werde. So sind die binokularen Fernrohre, bei denen die Gegenstände zwar angenähert aber immer doch in großen Abständen erscheinen sollen, selbstverständlich so einzurichten, daß die Beobachtung mit annähernd parallelen, nicht etwa stark konvergenten Augenachsen stattfindet. Entsprechend wird es sich bei den stereoskopischen Apparaten, wo stark verkleinerte Modelle in geringem Abstande gesehen werden sollen, empfehlen, die Einrichtung so zu treffen, daß die Augenachsen den entsprechenden Konvergenzgrad annehmen müssen. Hier wird man freilich schon mehr im Zweifel sein können, ob nicht andere Rücksichten (namentlich auf die Ermüdung der Augenmuskeln) es rätlicher machen, gleichfalls mit annähernder Parallelstellung beobachten zu lassen.

Der letzte und wichtigste hier noch zu erwähnende Punkt betrifft die Voraussetzung, die wir in betreff der irgendwelchen binokularen Parallaxen entsprechenden subjektiven Tiefenwerte gemacht haben.

Wir gingen von der Annahme aus, daß, wenn bestimmte Netzhautbilder uns den Eindruck eines Gegenstandes in einer gewissen absoluten Entfernung E geben, der Eindruck auch im übrigen der Beschaffenheit entspricht, die ein Gegenstand in dieser Entfernung haben müßte, um die betreffenden Netzhaut-

bilder zu ergeben. Diese Annahme stützt sich zunächst auf die ganz entsprechende, zu der wir auch in bezug auf die binokular wahrgenommenen Tiefen bei gewöhnlicher freiäugiger Betrachtung von Gegenständen gelangt waren. Wie erinnerlich, sahen wir, daß vorderhand wenigstens kein begründeter Anlaß vorliegt, regelmäßige und bestimmte Abweichungen von diesem Prinzip anzunehmen. Wir dürfen hier wohl hinzufügen, daß auch kein Anlaß zu der Annahme besteht, daß sich die Dinge anders verhalten, wenn wir den Augen künstlich erzeugte Bilder darbieten, als wenn sie in gewöhnlicher Weise die Gegenstände direkt erblicken. Aus diesem Grunde ist es, wie ich glaube, berechtigt, zunächst wenigstens von diesem Prinzip auszugehen. Allerdings aber muß bemerkt werden, daß die experimentelle Prüfung des ganzen Gebietes zurzeit noch eine sehr unvollständige ist, und daß daher die auf dieses Prinzip aufgebaute Betrachtung streng genommen zunächst nur die Bedeutung eines Versuches beanspruchen kann. Außerdem werden wir betonen müssen, daß die in jenem Prinzip ausgesprochenen Bewertungen der wahrgenommenen Tiefen nicht als strenge oder mathematisch genaue angesehen werden dürfen. Es wäre dies schon aus dem Grunde irrtümlich, weil die wahrgenommenen Werte als solche von subjektiver Bedeutung einer präzisen Bemessung sich überhaupt entziehen. Sodann muß auch beachtet werden, daß, wie die ganzen Verhältnisse der Tiefenwahrnehmung dies mit sich bringen, die hier verlangten Werte aller Wahrscheinlichkeit nach durch sehr mannigfaltige Umstände verschiedener Art modifiziert werden können. Insbesondere mußten wir mindestens die Möglichkeit erwähnen, daß die binokulare Tiefenwahrnehmung in quantitativer Beziehung überhaupt keine ganz festgelegte ist, sondern durch empirische Momente mehr oder weniger beeinflußt werden kann.

Ist letzteres der Fall, so werden wir vermuten dürfen, daß auch Darstellungen, die von den obigen Regeln mehr oder weniger abweichen, nicht ohne weiteres als Störungen sich geltend machen werden. Es ist nun allerdings naheliegend zu sagen, daß in solchen Fällen uns die Gegenstände durch Vermittelung der optischen Verfahrungsweisen) in einer Form dargeboten werden, in der wir sie in Wirklichkeit niemals sehen können und daß, wenn wir dies nicht als Störung oder Nachteil bemerken, sich hier lediglich ein Mangel an Aufmerksamkeit und Beobachtung, mit einem Worte an Schulung des Sehens ausdrückt. Es ist indessen, wie mir scheint beachtenswert, daß sich die Dinge doch auch unter einem anderen Gesichtspunkte betrachten lassen. Jede flächenhafte Darstellung im Gemälde zeigt uns ja die Gegenstände auch in einer Weise, in der sie, wenn wir sie selbst freiäugig betrachten, niemals erscheinen können. Durch die häufige Beschäftigung mit solchen Darstellungen gewöhnen wir uns ohne Zweifel daran, sie in einer Weise aufzufassen, die den dargestellten Gegenständen entspricht und es liegt hierin eine gewisse Entwickelung der Einbildungskraft. Je mehr aber sich diese ausbildet, um so mehr werden wir schließlich übersehen, daß wir einen Anblick haben, wie ihn die wirklichen Gegenstände unter keinerlei Umständen hervorbringen könnten. Was man also zunächst als einen Mangel an richtigem Sehen aufzufassen geneigt ist, kann, unter anderem Gesichtspunkte betrachtet, auch als eine für das Verständnis gewisser Darstellungen nützliche Ausbildung gelten. Es ist jedenfalls eine wohl aufzuwerfende Frage, ob sich die Dinge für die Betrachtung stereoskopischer Aufnahmen und bei der Benutzung binokularer Fernrohre nicht ähnlich verhalten.

Die letzten Betrachtungen erstrecken sich, wie man sieht, nicht mehr darauf, was wir für die binokularen Methoden als Regel aufstellen können, sondern vielmehr auf die Bedeutung, die solchen Regeln beizumessen ist. Nimmt man an, was die zuletzt berührten Verhältnisse einigermaßen wahrscheinlich machen, daß diese Bedeutung immer nur eine mehr oder weniger bedingte ist, so wird es verständlich erscheinen, daß die Abweichungen von solchen Regeln da, wo sie unvermeidlich sind (wie z. B. bei den binokularen Fernrohren), nicht gerade als erheblicher Übelstand sich geltend machen. Zugleich erscheint es dann aber auch einigermaßen fraglich, ob eine strenge Einhaltung jener Regeln, da wo sie an sich möglich wäre, sich tatsächlich allgemein durchsetzen wird.

Es bleibt uns übrig, über die in neuerer Zeit konstruierten binokularen Instrumente noch einige spezielle Angaben zu machen. Wir dürfen dabei von einer Berücksichtigung der nur in physikalisch-technischer Beziehung interessierenden Konstruktionsdetails absehen. Auch dürfen wir uns wenigstens in erster Linie auf die Erzeugnisse der Zeiss-Werke beschränken, die nicht nur wegen ihrer hohen technischen Vollkommenheit eine hervorragende Stelle einnehmen, sondern wegen des engen Anschlusses an die theoretischen Forderungen hier von besonderem Interesse sind. Was zunächst die binokularen Fernrohre mit Basisvergrößerung anlangt, so werden diese gegenwärtig von den Zeiss-Werken in zwei Formen ausgeführt, die unter dem Namen der Feldstecher und Teleplaste in den Handel gebracht werden.[1] Man bezeichnet bei diesen Instrumenten die Vergrößerung des scheinbaren Augenabstandes, den oben mit δ bezeichneten Wert, als ihre spezifische Plastik. Sie beträgt für die Feldstecher 1,7—2,0, für Teleplaste 3—7. Als totale Plastik bezeichnet man das Produkt aus Fernrohrvergrößerung und Vermehrung der Augendistanz, also in unserer obigen Bezeichnung den Wert $\alpha\delta$. Ihm kommt die Bedeutung zu, daß, wenn zufolge der binokularen Tiefensehschärfe in der Entfernung G mit freiem Auge die Tiefendifferenz X gerade an der Grenze des Wahrnehmbaren ist, bei Benutzung des betreffenden Instrumentes die eben wahrnehmbare Tiefendifferenz sich auf $X/\alpha\delta$ belaufen wird.

Unter den die Brauchbarkeit der binokularen Fernrohre erhöhenden besonderen Hilfseinrichtungen sind vornehmlich diejenigen zu erwähnen, die zur Entfernungsmessung bestimmt sind. In den sogen. Telemetern ist in beiden Fernrohren an derjenigen Stelle, wo die reellen Bilder der äußeren Gegenstände liegen, je eine Glasplatte mit korrespondierenden Marken angebracht; diese sind derart angeordnet, daß sie die gleichen binokularen Parallaxen haben, wie Gegenstände von bestimmten passend gewählten Entfernungen. Bei stereoskopischer Vereinigung erscheinen sie als Objekte in bestimmter Anordnung zu den realiter vorhandenen äußeren Gegenständen, und bilden somit eine Entfernungsskala, mit der die verschiedenen gesehenen Objekte unmittelbar verglichen werden können. Da bei Betrachtung irdischer Objekte meist der obere Teil des Gesichtsfeldes frei bleibt, so werden die Marken in diesen verlegt; man sieht demgemäß die Skala der Entfernungsmarken frei in der Luft schweben und kann für einen beliebigen Gegenstand denjenigen Teil der Skala angeben, der senkrecht über ihm, also mit ihm in gleicher Entfernung erscheint.

---

[1] Über die optische Einrichtung dieser Instrumente siehe insbesondere Czapski, Über neue Arten von Fernrohren. Berlin 1895.

Unter den binokularen Mikroskopen ist hier vor allem das von den Zeiss-Werken auf Anregung von Greenough konstruierte zu erwähnen, von dem schon oben die Rede war. Das Instrument ist neuerdings in mehreren verschiedenen Formen, die speziell für die Untersuchung der Haut und der Hornhaut bestimmt sind, ausgeführt und mit hierfür passenden Beleuchtungsvorrichtungen versehen worden.

Für die Aufnahme stereoskopischer Photographien mit einer dem Augenabstande gleichen Basis ist die Palmos-Kamera konstruiert.

Als Betrachtungsapparat liefern die Zeiss-Werke ein Stereoskop, das in sehr zweckmäßiger Weise die Verstellung der Okulare gegen die Bilder, sowie auch des Abstandes der beiden Okulare voneinander gestattet, übrigens sowohl für gewöhnliche Photographien wie für Diapositive benutzt werden kann.

Außer diesem sei hier noch das Verant-Stereoskop angeführt. Wenn man, um Seheindrücke in natürlicher Größe zu erhalten, den Abstand der Aufnahmeapparate nicht über 65 mm steigern will, so können auch die stereoskopischen Bilder keine größere Breite erhalten, als etwa 60 mm. Sollen diese einer nicht zu kleinen Winkelbreite entsprechen, so müssen ziemlich starke photographische Objektive angewendet, entsprechend dann im Hinblick auf die Orthomorphie die Bilder aus geringer Entfernung und demgemäß mit starken Lupen betrachtet werden. Bei der stark schrägen Durchsicht, die für die seitlichen Teile der Bilder besteht, liefern nun aber die gewöhnlichen Lupen keine guten Bilder. Im Hinblick hierauf sind die Verant-Linsen der Forderung angepaßt, daß für ein in bestimmtem Abstand (25 mm) von ihnen befindliches Auge die Bildgüte erhalten bleibt, wenn das Auge sich um beträchtliche Winkel dreht. Die Anwendung solcher Linsen ist für die Betrachtung stereoskopischer Photographien der erwähnten Beschaffenheit besonders vorteilhaft.

Das von Pulfrich konstruierte und als Stereokomparator bezeichnete Instrument[1] ist in der Hauptsache ein Stereoskop, bei dem ähnlich dem Telemeter in die zur Betrachtung dienenden optischen Einrichtungen Marken eingefügt sind und zwar einerseits eine feste, andererseits eine mittels Mikrometerschraube von rechts nach links verschiebbare. Bei stereoskopischer Vereinigung erscheint diese Marke als ein Objekt, dessen scheinbare Entfernung vermöge der genannten Verschiebung verändert werden kann. (Prinzip der wandernden Marke). Betrachtet man in einem solchen Instrument photographische Aufnahmen und stellt die Marke so ein, daß sie mit verschiedenen Teilen des durch die stereoskopische Vereinigung erzeugten Gebildes zusammenzufallen scheint, so läßt sich daraus die Entfernung dieser Teile mit großer Genauigkeit berechnen. Eine Anwendung dieses Verfahrens auf mikroskopische Objekte ist von Heine[2] versucht worden.

Da die binokularen Methoden der Entfernungsmessung vielfach von hervorragender praktischer Bedeutung sind, andererseits, wie die Erfahrung lehrt, ihre Brauchbarkeit in hohem Maße von der Individualität des Beobachters abhängt, so ist es von Wichtigkeit, die Befähigung, die jemand in dieser Richtung be-

[1] Zeitschr. f. Instrumentenkunde. XXII. 1902. XXIII. 1903. Neue stereoskopische Methoden. Berlin 1903.

[2] Arch. f. Ophthalm. LV. S. 285. 1903.

sitzt, mit Sicherheit ermitteln zu können. PULFRICH[1] hat zu diesem Zwecke eine Prüfungstafel angegeben. Die nach Art eines Stereoskopbildes eingerichtete Tafel stellt eine größere Zahl von Gegenständen dar, deren Lagen im rechten und linken Bild sich teils mehr teils weniger voneinander unterscheiden. Bei richtiger stereoskopischer Vereinigung erscheinen diese in einer Reihe verschieden großer Parallaxen, und es läßt sich ermitteln, bei welchem Betrage der Parallaxe der Beobachter die Tiefendifferenz noch mit Sicherheit wahrnimmt.

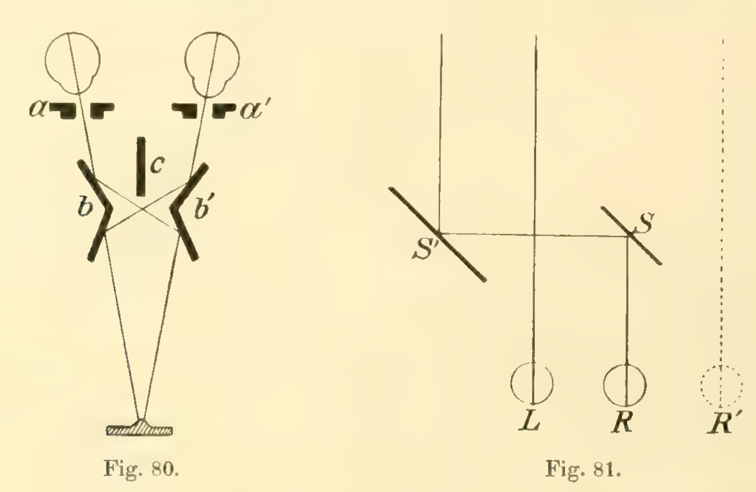


Fig. 80. Fig. 81.

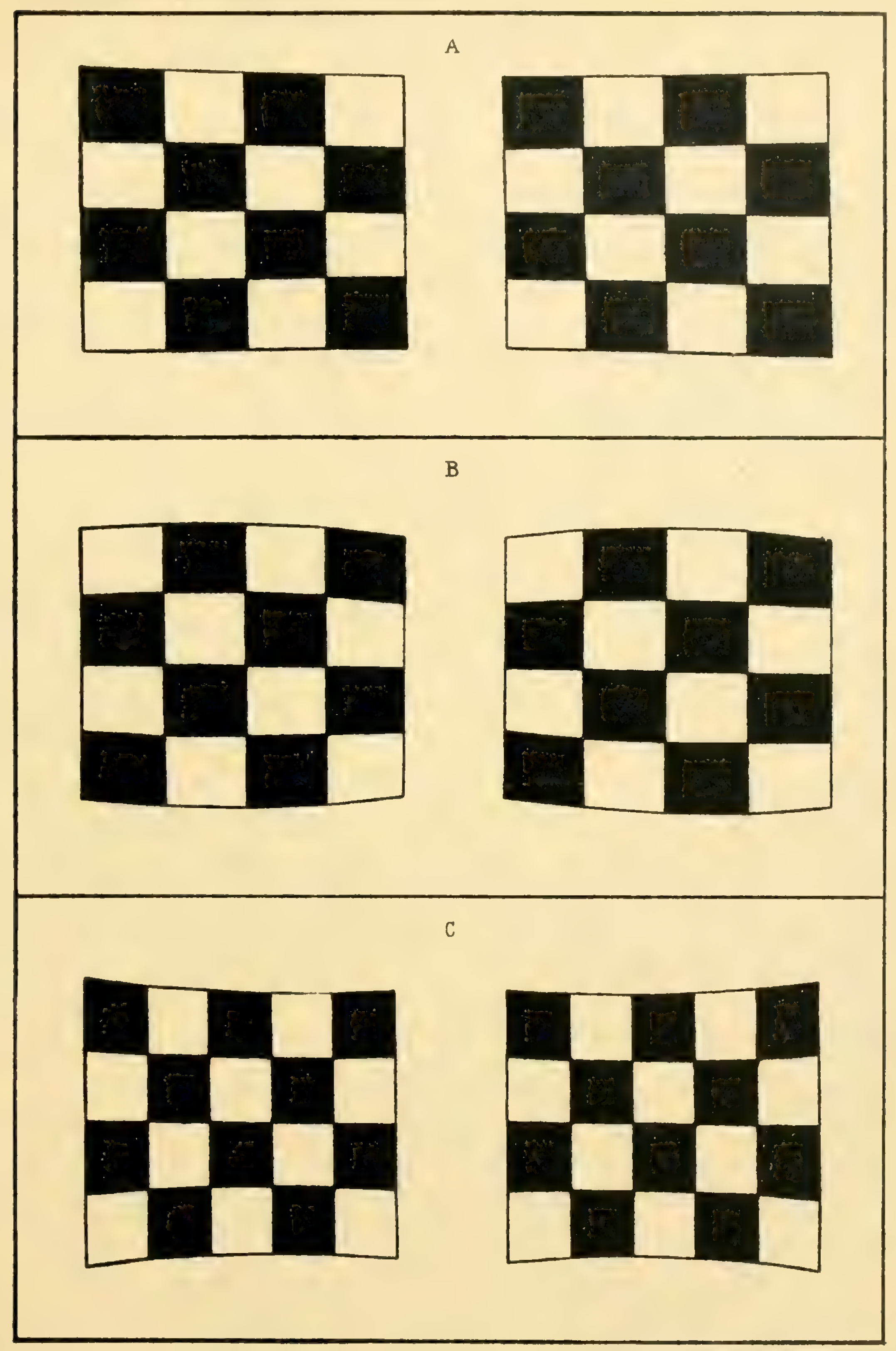
Aus der großen Zahl der zu wissenschaftlichen oder experimentellen Zwecken konstruierten Instrumente mögen hier noch zwei neuere Formen von Pseudoskopen Erwähnung finden. Das von EWALD[2] angegebene, vertauscht mittels zweier Spiegelpaare *b* und *b'* in einer aus der Figur 80 unmittelbar ersichtlichen Weise die rechts- und linksäugige Ansicht eines Gegenstandes. Das von STRATTON[3] beschriebene Instrument, Figur 81, besteht aus zwei parallelen Spiegeln *S* und *S'*. Stehen die Augen in *L* und *R*, so erhält das rechte, wie ersichtlich, eine Anschauung der Gegenstände, als ob es sich links von *L* befände; das Instrument wirkt als Pseudoskop. Bringt man das linke Auge nach *R* und das rechte nach *R'*, so werden die Eindrücke des linken Auges in der gleichen Weise verändert und das Instrument kann als Telestereoskop dienen.

Da das von den Spiegeln entworfene virtuelle Bild des in *R* befindlichen Auges nicht nur weiter nach links, sondern zugleich auch weiter zurückliegt, so ist das Instrument nur für sehr entfernte Gegenstände als korrekt zu betrachten.

[1] Zeitschrift für Instrumentenkunde. XXI. Neuerdings haben die Zeiss-Werke eine andere, jedoch auf den gleichen Prinzipien beruhende und nur im Detail verschiedene Prüfungstafel herausgegeben.

[2] PFLÜGERS Archiv. CXV. S. 514. 1906.

[3] Psychological Review. 5. S. 632. 1898.



Photolithogr. Julius Klinkhardt Leipzig

Verlag von Leopold Voss in Hamburg und Leipzig.



D

E

F

G

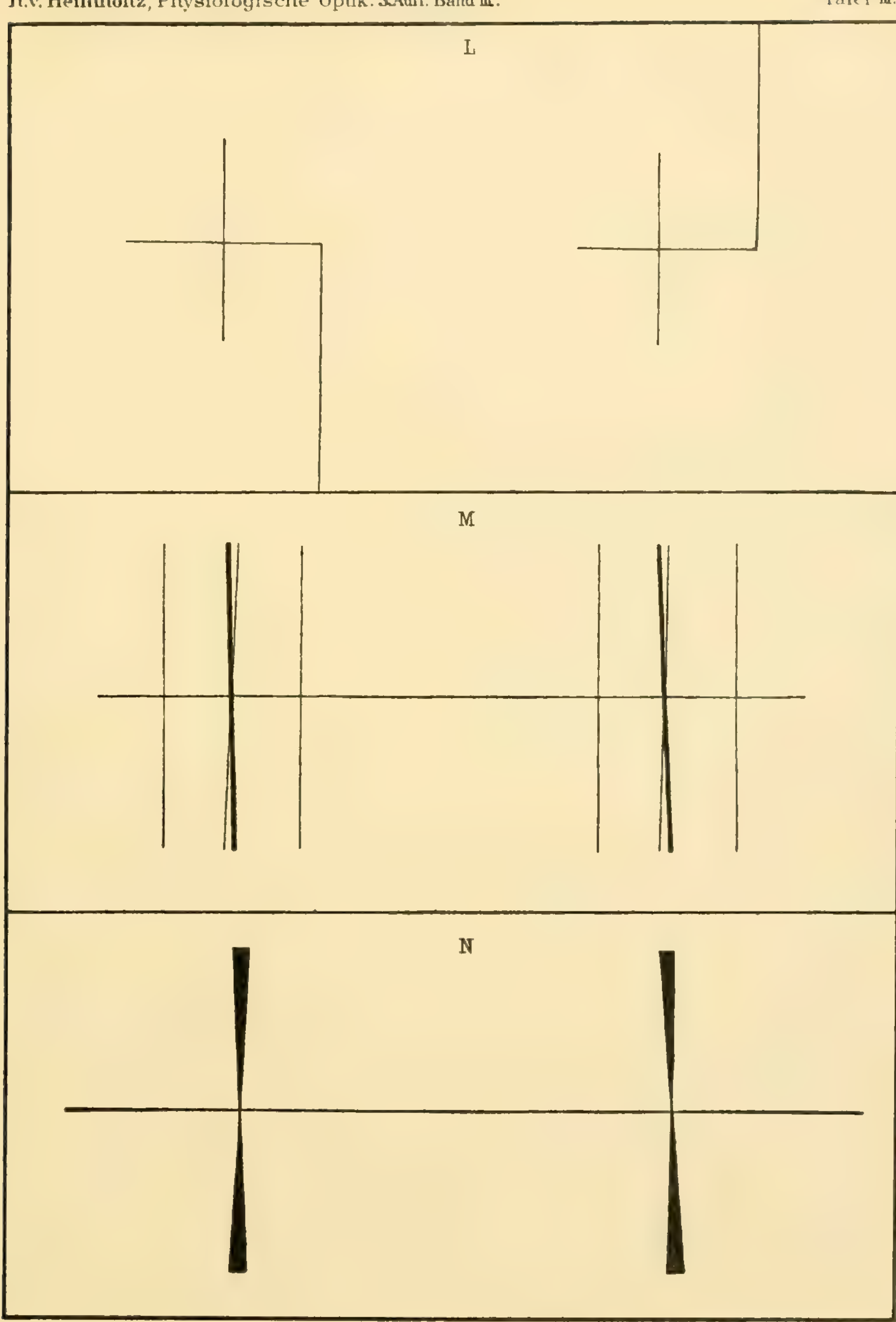
H

J

Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig

Verlag von **Leopold Voss** in Hamburg und Leipzig

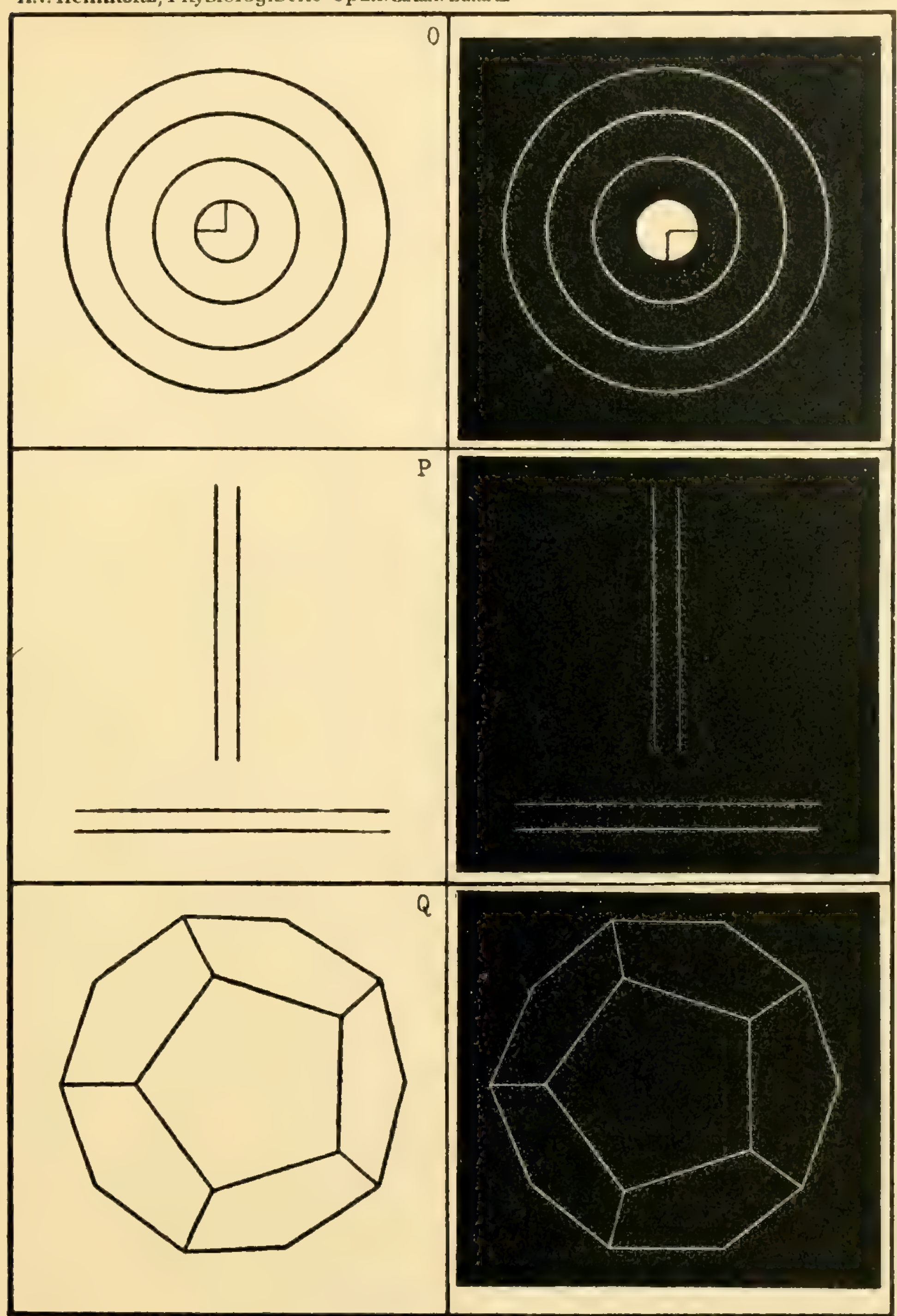




Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig.

[illegible] von Leopold Voss [illegible]

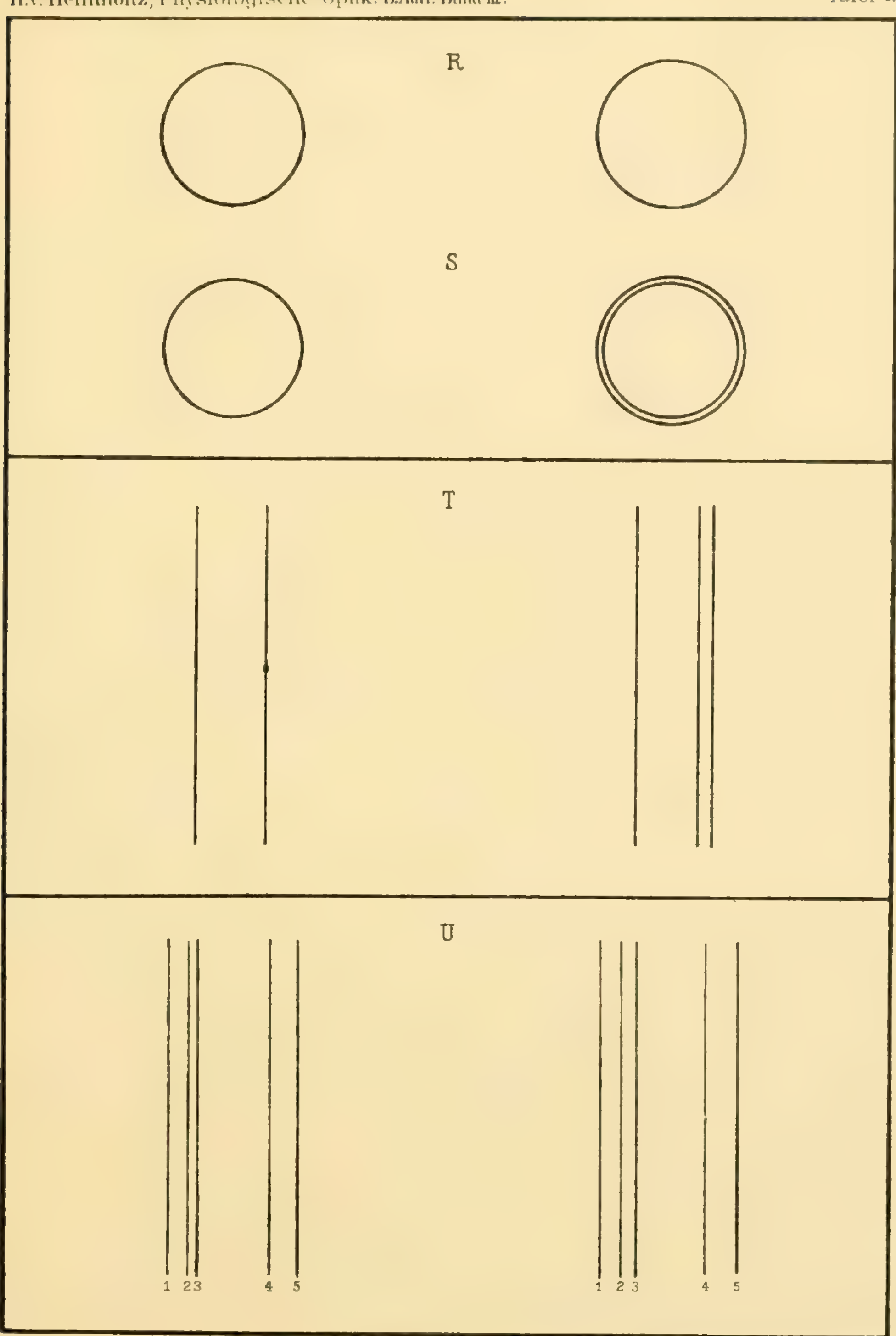




Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig

Verlag von **Leopold Voss** in Hamburg (und Leipzig)

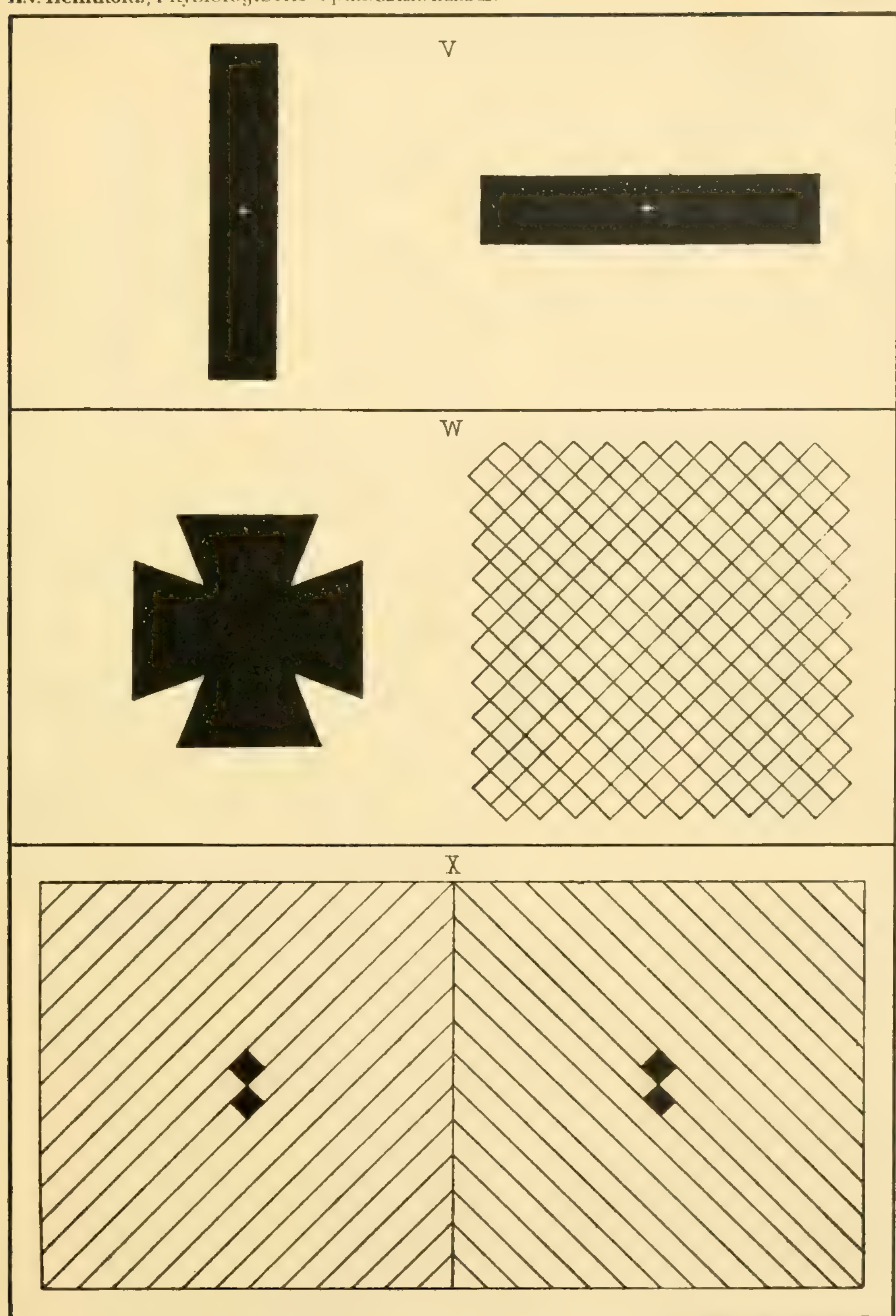




Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig.

Verlag von Leopold Voss in Hamburg und Leipzig.





Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig

Verlag von Leopold Voss in Hamburg und Leipzig



